

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ**



DIPLOMOVÁ PRÁCE

LIBEREC 2013

Bc. Lukáš Netík

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ**

Studijní program: N3108 Průmyslový management
Studijní obor: Management jakosti

VLIV POČTU VRSTEV NA VÝSLEDNÉ MECHANICKÉ VLASTNOSTI KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ S UHLÍKOVÝMI VLÁKNY

IMPACT NUMBER OF LAYERS ON RESULTS MECHANICAL QUALITY COMPOSITES WITH CARBON FIBRES

Bc. Lukáš Netík
KHT-191

Vedoucí diplomové práce: Miroslava Maršálková, Ing. Ph.D.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran textu: 55

Počet obrázků: 42

Počet tabulek: 14

Počet stran příloh: 0

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

1. Vypracujte literární rešerši na téma: využití vlákenných struktur v kompozitech obecně; uhlíkové kompozitní materiály, jejich vlastnosti a použití.
2. Navrhněte a realizujte experiment pro vrstvy paralelně uspořádaných uhlíkových vláken při daném úhlu křížení dvou, čtyř a šesti vrstev.
3. Vytvořené kompozitní materiály podrobte těmto zkouškám: tah, tlak, 3PB staticky i dynamicky, Charpy, případně další.
4. Naměřené výsledky testů statisticky vyhodnoťte a interpretujte.

Literatura:

R.A. Bareš: Kompozitní materiály, SNTL Praha 1988

Agarwal, B.D., Broutman, L.J.: Vláknové kompozity, SNTL Praha 1987

Gottfried W. Ehrenstein: Polymerní kompozitní materiály, SCIENTIA Praha 2009

M.F.Ashby: Materials Selection in Mechanical Design. 3. ed. Butterworth-Heinemann, (2005)

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících

s právem autorským). Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL. Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon c. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo). Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užití své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladu, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci dne 27.5. 2013

.....

Podpis

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Miroslavě Maršálkové, Ph.D. za odborné vedení konzultací, cenné rady a připomínky. Mé poděkování patří zejména jí pak rodičům i prarodičům, kteří jsou vždy se mnou, když je třeba. Dále Markovi Ščerbovi, který mě neustále pobízel a motivoval. Děkuji všem svým kamarádům za otevření nových obzorů a posunutí životních hranic, které s nimi překonávám, za cíle jaké jsem si díky nim vybral.

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá uhlíkovými kompozitními materiály. V rešeršní části je uvedeno rozdělení kompozitů z hlediska matrice a výztuže, dále je zde uveden popis zkoušek používaných pro testování mechanických vlastností kompozitů a použití uhlíkových kompozitů. V experimentální části je popis výroby a popis vzorků testovaných kompozitů. Jsou zde uvedeny výsledky testů: statický tříbodový ohyb na dynamometru, dynamický tříbodový ohyb na DMA a Charpy test houževnatosti. V závěru jsou výsledky měření shrnuty a statisticky vyhodnoceny.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Uhlíkový kompozit, matrice, Charpy test, tříbodový ohyb

ANNOTATION

The thesis provides overview of dealing with carbon composite materials. The research part introduce to the breakdown of composites in terms of the matrix and the reinforcement. There is also a description of the tests used for testing the mechanical properties of composites and using carbon composites. In the experimental part there is description of manufacture and description of samples tested composites. In thesis are present results of tests: static 3point bending test on a dynamometer, dynamic 3point bending test on the DMA machine and Charpy toughness.

In the conclusion are measurement results summarized and analyzed statistically.

KEY WORDS :

Carboncomposite, matrix, Charpytest, 3-pointbending test

Seznam použitých symbolů a zkratk

b	šířka vzorku	[mm]
DMA	dynamicko – mechanická analýza	
E	modul pružnosti v ohybu	[N/mm ²]
E	energie nárazu/ průrazu	[J/mm ²]
E^*	komplexní modul E	[GPa]
E'	reálná část modulu E	[GPa]
E''	imaginární část modulu E	[GPa]
E_{max}	konečná energie	[J]
E_{Fmax}	počáteční energie	[J]
f	frekvence	[Hz]
F	síla	[N]
F_m	maximální dosažená síla	[N]
FFT	Fast Fourier Transform	[-]
h	tloušťka	[mm]
HM	High Modul	[-]
IM	Intermediate Modul	[-]
l	délka	[mm]
L	rozpětí podpěr	[mm]
t	teplota	[°C]
T	jemnost příze	[tex]
X	průhyb	[mm]
ρ	měrná hmotnost	[kg/m ³]
ρ_s	plošná hmotnost	[kg/m ²]
σ_x	napětí v ohybu	[Pa]
$\tan \delta$	ztrátový činitel	[-]
Z	protonové číslo	[-]

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Vlákna v kompozitních materiálech	10
2.1	Uhlíková vlákna	12
2.1.1	Uhlík	12
2.1.2	Výroba uhlíkových vláken.....	15
2.2	Úprava povrchu uhlíkových vláken	19
2.3	Mechanické zkoušky - pevnost	20
2.3.1	Tah	20
2.3.2	Tříbodový ohyb.....	23
2.3.3	Typické vlastnosti uhlíkových vláken	23
2.4	Sport a uhlíková vlákna.....	26
2.4.1	Horské kolo.....	27
2.4.2	Lyže	29
3	Experimentální část.....	31
3.1	Výroba vrstvených kompozitních materiálů	31
3.2	Testování kompozitních materiálů	36
3.2.1	Zkouška 3 – point bending na dynamometru.....	36
3.2.2	Zkouška 3 – point bending na dynamicko – mechanické analýze (DMA)	37
3.2.3	Charpyho kladivo.....	43
4	Výsledky a diskuze	47
4.1	Statická 3 – point bending zkouška na dynamometru.....	47
4.2	Zkouška 3 – point bending na dynamicko – mechanické analýze (DMA)	50
4.3	Charpyho kladivo	53
5	Závěr	55
	Použitá literatura	57

1 Úvod

Téma kompozitních materiálů je zajímavé a má v budoucnu vysoký potenciál. Uhlíkový kompozit je všude kolem nás a můžeme očekávat jeho zvyšující se výskyt. Toto téma bylo navrženo na vypracování práce s možností jeho realizování i s možností využití tohoto výzkumu v praxi.

Kompozitní materiály se využívají všude kolem nás v leteckém automobilovém ale i energetickém průmyslu. Ve sportu se vyskytují v těchto odvětvích camping, cyklistika, hokej, florbal, golf, lyžování, cyklistika, yachting, lukostřelba, formule, motokros a mnoho dalších. Vyrábí se z nich horská kola, lyže, kajaky, hokejky, běžecké hole a další sportovní vybavení. S kompozitními uhlíkovými ale i jinými vlákny se setkáváme denně nejvíce v letectví a v dopravních prostředcích. Dle norem Evropské unie o snižování emisí u automobilů, je zapotřebí materiály na jejich výrobu zlehčovat, i to je jeden ze způsobů snížení emisí.

Uhlíkové kompozitní materiály mají díky svému složení velkou pevnost, která záleží způsobu kladení výztuže například: na úhlech křížení vláken, druhu matrice a počtu vrstev v kompozitu. Je to jeden z nejlehčích a nejpevnějších materiálů na světě. V daném směru je i pevnější než železo. Jednou z pozitivních vlastností je také vynikající utlumení/pohlcování nárazů. Jeho nevýhodou je vysoká cena díky svým nákladným výrobním nákladům.

Cílem diplomové práce je vyrobit dvouvrstvý, čtyřvrstvý, šestivrstvý uhlíkový kompozit a porovnat jaký vliv mají počty vrstev v kompozitu na výsledné mechanické vlastnosti ručně kladeného kompozitního materiálu.

2 Vlákna v kompozitních materiálech

Charakteristika kompozitu: materiál složený ze dvou nebo více složek s rozdílnými vlastnostmi, které dohromady dávají výslednému výrobku nové vlastnosti. Toto působení popisuje tzv. synergický efekt – součinitel více činitelů, který je však kvalitativně i kvantitativně jiný než jejich samotný součet. V případě uhlíkového kompozitu jsou jednou ze substancí uhlíková vlákna zajišťující pevnost a druhou pojivo (nejčastěji polymerního typu pojiva). Typ použitých vláken ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti kompozitu.

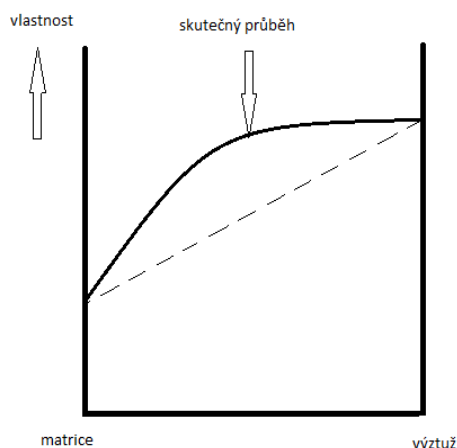
Největší pevnost a tuhost dosahují vláknové kompozity s kontinuálními vlákny.

Kontinuální vlákna mohou být:

- skleněná
- čedičová
- uhlíková
- polymerní
- proteinová
- borová
- keramická

Matrice (pojivo výztuže) může být:

- polymerní (reaktoplastická nebo termoplastická)
- kovová
- skleněná
- sklokeramická
- keramická
- uhlíková



Obr. 2.1: Schéma – Synergický efekt [18]

Vláknové **mikrokompozity** obsahují vlákna o průměru 10 až 10^2 mikrometrů. Některé kompozity obsahují vlákna o průměru pod $1\ \mu\text{m}$ v podobě krátkých (diskontinuálních) nanovláken a zařazují se proto mezi **nanokompozity**. [8]

Kompozit ve vlákenné formě má podstatně vyšší pevnost než pevná látka ze stejného materiálu. Čím tenčí vlákno, tím vyšší je jeho relativní pevnost. Skutečná pevnost jednotlivých vláken v kompozitech je mnohem nižší než pevnost teoreticky vypočítaná, kompozit jako celek však snáší i zatížení, pod kterým by se jednotlivá vlákna trhala.

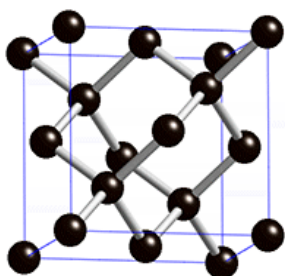
Pevnost vlákna je vždy významně větší než pevnost stejného materiálu v kompaktní formě. Příčinou je malý příčný průřez vláken. V tenkých vláknech jsou minimalizovány rozměry vrozených vad materiálů a také nebezpečí povrchových vad je při velmi malých příčných rozměrech menší (tenká vlákna mají oproti stejně dlouhým vláknům větších průměrů významně menší povrch). Vady existují jen v podobě submikroskopických až mikroskopických trhlinek a dutinek, které jsou přednostně orientovány (protaženy) v podélném směru vlákna. [8]

Výztuž je tvrdší, tužší a podstatně pevnější, nespojitá složka kompozitu. Vlákna zpevňují kompozitní materiál jen v tom směru, ve kterém jsou uložena.

Matrice je spojitá, poddajnější složka, s jejíž pomocí se vlákna impregnují a tak se stabilizuje jejich poloha, adhezí mezi vláknem a matricí se přenáší zatížení kompozitu a matrice chrání vlákna před vnějšími vlivy. Whiskery jsou monokrystaly o velmi

malých příčných rozměrech [nm] a krátké délce. Dosahují velmi vysoké pevnosti (řádově 10^4 MPa), protože neobsahují defekty.

2.1 Uhlíková vlákna



Obr. 2.2: Struktura diamantu



Obr. 2.3: Struktura grafitu [16]

2.1.1 Uhlík

- čistý uhlík se vyskytuje ve dvou modifikacích, jako *diamant* a *grafit* (tuha)
- **diamant** - nejtvrdší přírodní látka, uhlíky jsou vázány čtyřmi pevnými kovalentními vazbami
- **grafit** - jednotlivé roviny uhlíkových atomů jsou navzájem poutány jen slabými vazbami - grafit je měkký a vede el. proud
- uhlík je poměrně málo reaktivní, s jinými prvky většinou reaguje až při vyšší teplotě
- k reakcím se místo čistého uhlíku používají jeho technické formy - *koks* a *uhlí*
- oxidace uhlíku (koks) za vysoké teploty se v průmyslu využívá k přímé redukci kovů z jejich oxidů
- koks a uhlí se používají jako palivo, diamanty (po vybroušení brilianty) v malé míře v klenotnictví, většina se jich používá k opracování tvrdých materiálů
- z grafitu se zhotovují elektrody, tavicí kelímky, tuhy, slouží také jako mazadlo, moderátor do jaderných reaktorů
- technický uhlík (*saze*) slouží jako plnidlo při výrobě pneumatik a plastů
- prvky IV.A skupiny periodické soustavy
- všechny p^2 -prvky jsou pevné látky

- uhlík a křemík jsou nekovy, germanium je polokov, cín a olovo jsou kovy
- jejich atomy poskytují k vytvoření kovalentních vazeb 2 až 4 elektrony
- atom uhlíku jako prvek 2. periody může být nejvýše čtyřvazný (např. v chloridu uhličitým CCl_4), atomy dalších p^2 -prvků mohou být v důsledku volných d -orbitalů až šestivazné (např. v hexafluorokřemičitanovém iontu SiF_6^{2-})
- stálost prvků s maximálním oxidačním číslem IV ve sloučeninách p^2 -prvků klesá se stoupajícím Z a naopak vzrůstá stálost sloučenin p^2 -prvků s oxidačním číslem II
- prvky C, Si, Ge a Sn tvoří v přírodních sloučeninách oxidační číslo IV, Pb oxidační číslo II
- zatímco sloučeniny s Sn^{II} působí redukčně (např. SnCl_2), sloučeniny Pb^{IV} (např. PbO_2) působí oxidačně
- sloučeniny p^2 -prvků s ox. č. IV mají převážně kovalentní vazby (např. CO_2 a SiO_2)
- ve sloučeninách obsahujících Sn^{II} nebo Pb^{II} převažuje až iontový charakter vazeb, např. v SnCl_2 a $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$
- uhlík jako jediný z p^2 -prvků může vytvářet řetězce uhlíkových atomů, spojených jednou (C-C), dvěma (C=C) nebo třemi (C≡C) kovalentními vazbami
- **uhlík** – se vyskytuje volný i ve sloučeninách, ostatní prvky jen ve sloučeninách, krystalizuje jako diamant a grafit, vázaný je obsažen v uhličitanech (nerosty: *kalcit* CaCO_3 , *magnezit* MgCO_3 , horniny: *vápenec*, *dolomit*), v ovzduší a ve vodách je uhlík jako CO_2 , dále je vázaný v uhlí, ropě, zemním plynu a ve všech organických látkách [12]

Charakteristika uhlíkových vláken:

Existuje mnoho marketingových triků okolo uhlíkových vláken a okolo technologií zpracování těchto vláken s cílem přesvědčit veřejnost o koupi výrobku. Reálné rozdíly v materiálu jsou však poměrně jednoduché. Porovnávacím parametrem je modul pružnosti - Youngův modul. Většina uhlíkových vláken se prodává s modulem pružnosti 33 MSI. Tato vlákna mohou být menšího průměru, což má za následek vyšší tuhost průřezu. Vláknem označované **Intermediate Modulus** (IM vlákna) má modul 42 MSI. Výhodou použití vláken s vyšším MSI znamená méně materiálu pro dosažení

stejně tuhosti a tedy lehčí konstrukce. Vlákna IM jsou však dražší díky vyšším nárokům na jejich výrobu. Dosažení vyšší tuhosti než vláken IM lze dosáhnout zmenšením průměru vlákna, ale zvýšením jeho hustoty. Tím vznikají vlákna HM (**H**igh**M**odul - 55 MSI a vyšší), která jsou poměrně drahá a křehká. [6]

The image shows a standard periodic table of elements. It is color-coded by groups: Group 1 (IA) is pink, Group 2 (IIA) is light blue, Groups 3-10 (IIB to VIII) are green, Group 11 (IB) is light green, Group 12 (IIB) is light blue, Group 13 (IIIA) is light green, Group 14 (IV A) is light blue, Group 15 (VA) is light green, Group 16 (VIA) is light blue, Group 17 (VII A) is light green, and Group 18 (0) is light blue. A legend in the top right corner identifies these groups: 'nekovy' (non-metals) in pink, 'alkalické kovy' (alkali metals) in light blue, 'alkalické zemní kovy' (alkaline earth metals) in light green, 'vzácné plyny' (noble gases) in light blue, 'halogeny' (halogens) in light green, 'metalloidy' (metalloids) in light blue, 'přechodné kovy' (transition metals) in light green, 'jiné kovy' (other metals) in light blue, and 'vzácné zemní prvky' (rare earth elements) in light green. A legend in the top left corner identifies element properties: 'název prvku' (element name) in pink, 'protonové číslo' (atomic number) in light blue, 'značka prvku' (element symbol) in light green, and 'relativní atomová hmotnost' (relative atomic mass) in light blue. The table includes elements from Hydrogen (H) to Oganesson (Og), with their symbols, atomic numbers, and names. The lanthanoid and actinoid series are shown at the bottom.

Obr. 2.4: Tabulka prvků

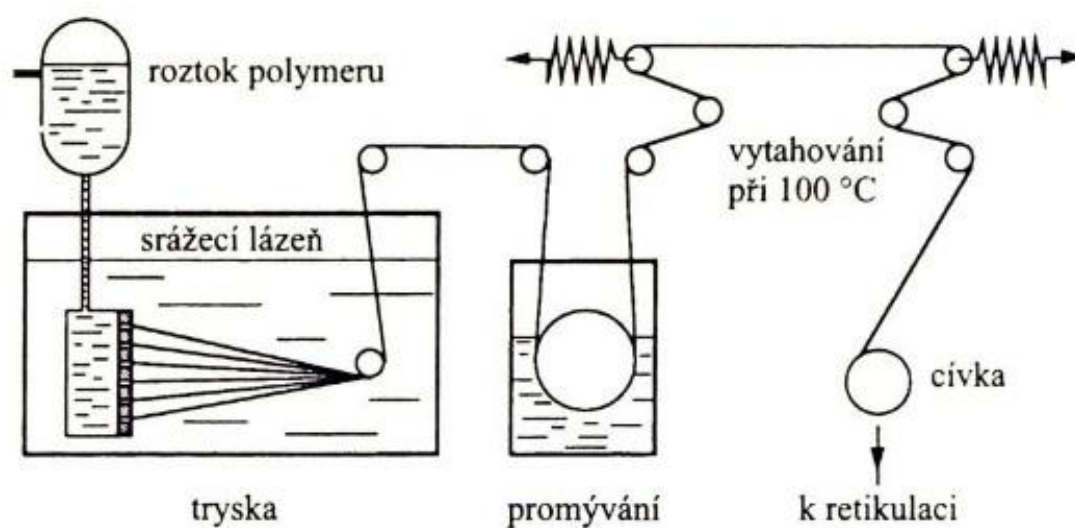
Uhlíková vlákna jsou dodávána v různých velikostech, určených v tisících (K) vláken - 1K, 3K, 6K, 12K, 24K, 50K a další. Tato vlákna jsou tkané do tkaniny různými vzory - 3K je nejčastější. Duratec (společnost zabývající se výrobou kompozitových materiálů) používá nejčastěji **UD (undirectional)** jednosměrné vlákno.

Charakteristika kompozitu:

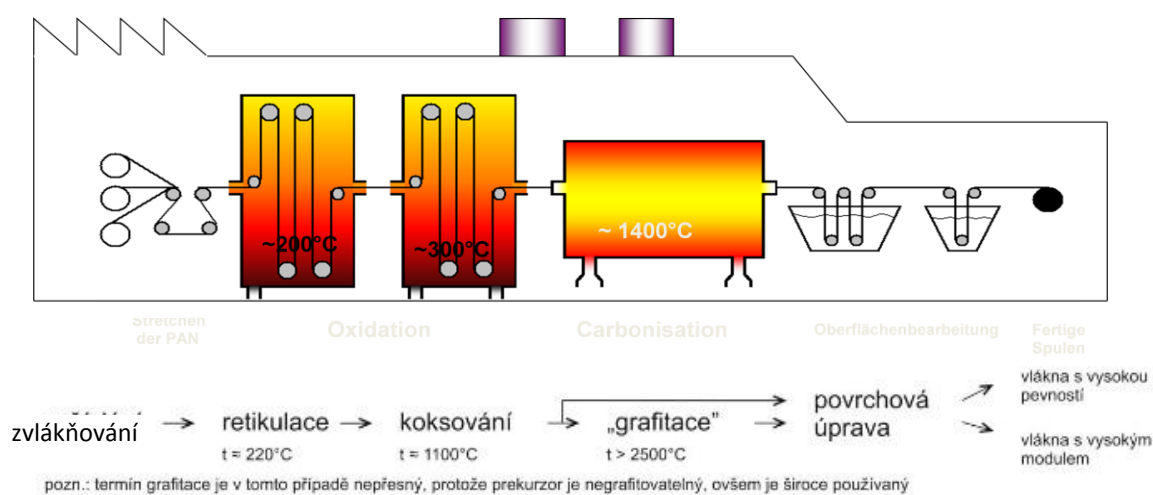
Materiál dvou nebo více složek s rozdílnými vlastnostmi, které dohromady dávají výslednému výrobku nové vlastnosti. V případě uhlíkového kompozitu jsou jednou ze substancí uhlíková vlákna zajišťující pevnost a druhou pojivo (nejčastěji polymerní pojivo). Typ použitých uhlíkových vláken ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti kompozitu z těchto látek vyrobeného.

2.1.2 Výroba uhlíkových vláken

Vzhledem k tomu, že uhlík netaje a je odolný vůči rozpouštědlům, nemohou být vyráběna uhlíková vlákna jako vlákna kovová. Uhlíková vlákna se vyrábí řízenou pyrolýzou organických prekurzorů, které mají formu vláken. Dále přichází v úvahu výroba katalickým rozkladem plyných uhlovodíků, ale tato metoda je příliš nákladná.[35]



Obr. 2.5: Zvlákňování polyakrylonitrilového vlákna



Obr. 2.6: Výroba uhlíkových vláken

SPLÉTANÉ STRUKTURY

Splétání karbonových kompozitů se provádí dvěma způsoby: biaxiálně a triaxiálně (dvojosé a trojosé splétání). Parametry biaxiálně splétané příze se mění křížením vláken, jejich orientací, silou a vydatností splétání. Tyto odchylky se opakují a lze je předvídat, což umožňuje přesnou výrobu kompozitních dílů. Karbonová vlákna jsou splétána v úhlu $\pm 45^\circ$. [13]

Triaxiální pletenina má mezi tyto dvě sady vláken vpletenu třetí sadu, ve směru osy trubky či pásky. Tím se jednak zvýší hustota spleteniny a jednak i její pevnost.

Vlastnosti kompozitů jsou velmi závislé na směru a úhlu splétání vláken. Fyzikální vlastnosti lze velmi účinně ovlivňovat i změnou podílu uhlíkových, skleněných vláken a nebo zcela jiných vláken v textilií. Dále se ovlivňují obsahem matrice (např. epoxidová pryskyřice) - nejvyšší podíl je 80%.

TVARY KOMPOZITŮ

Standardně je z vláken na pletacím stroji splétána tzv. "punčocha", která má velmi přizpůsobivý tvar s možností upravit ho dle požadavků zákazníka. Na jádro formy je naplétána příze, která posléze tvoří pevnou pleteninu, která je vyztužena dalšími vlákny ve směru podélné osy. Tento jedinečný triaxiální náplet značně zvyšuje tuhost a ohybové vlastnosti kompozitu. Po prosycení epoxidovou pryskyřicí je jádro formy odstraněno a výsledný výrobek je vytvrzen v autoklávu. [13]



Obr. 2.7: Splétací stroj

Povrchová úprava

Kompozity vyrobené z očištěných a upravených uhlíkových vláken mají velkou smykovou pevnost rozhraní vláken a matrice i velkou mezilaminární (interlaminární) smykovou pevnost. Použije-li se navíc mezifáze v podobě tvárného polymerního povlaku, zlepší se odolnost kompozitu proti vzniku podélných trhlin v rozhraní vlákno/matrice, které se jinak objevují při mechanickém namáhání kompozitu bez této mezivrstvy. Lubrikační látky, jako polyvinylalkohol nebo silikonový olej, silně zhoršují, až znemožňují vazbu vláken a matrice, ale na druhé straně zvyšují schopnost kompozitního dílu pohltit energii, např. při namáhání rázem. Vlákná se totiž při lomu snadno vytahují z matrice a nedochází k jejich porušení v rovině šířící se lomové trhliny.

Proces vytahování vláken však spotřebovává více energie než energie spotřebovaná na tvorbu lomových povrchů vláken. Pro zvětšení houževnatosti při zachování dobré soudržnosti vláken a matrice je výhodné opatřit vlákna např. přínavným povlakem kaučuku, který způsobí, že vytahování vláken je doprovázeno větším třením.

Na očištěný povrch se mechanicky, fyzikálně i chemicky lépe vážou funkční skupiny povlaků nanášených za mokra. Používají se například oligomery na bázi epoxidů nebo polyamidy, rozpuštěné v organických rozpouštědlech. Existují také blokové kopolymery, které v hotovém povlaku vytvoří na vnější straně (od vlákna) vrstvu s přirozenou afinitou k polymerní matici.

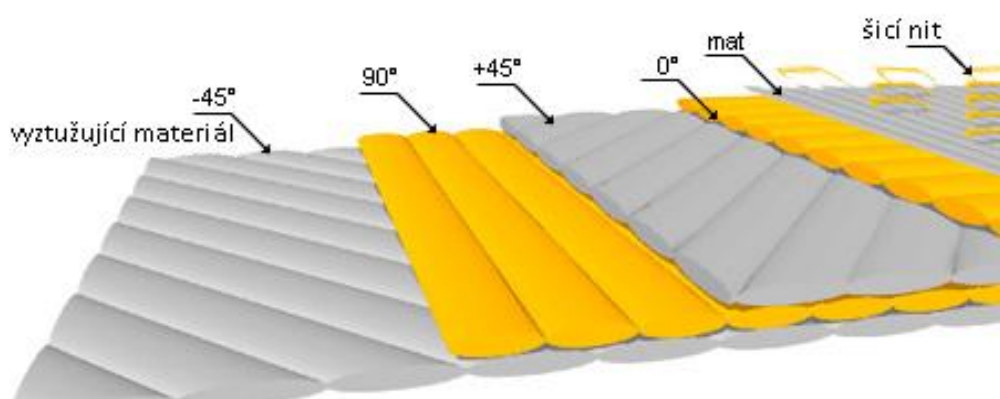
Biaxální tkaniny

Biaxiální textilie jsou produkty vyráběné na šicích strojích, kde jsou polyesterovými nitěmi sešita vlákna osnovy a útku přímého skelného rovingu (pod úhlem $0^\circ/90^\circ$). Tuto tkaninu je možné kombinovat s rohoží ze sekaných skelných vláken o délce 50 mm, která je na povrch biaxiálních produktů našívána. Výhodou spojení vrstev prošitím, je lepší tvarovatelnost vícevrstvého polotovaru, rychlejší smáčení vláken a nepřítomnost zbytků vazebného prostředku na povrchu vláken.

Biaxiální tkaniny umožňují produktivní výrobu laminátu s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi. Tento produkt je určen na kontaktní laminování tlustostěnných dílů a pro injekční technologie SRIM nebo RTM.[15]

Multiaxiální tkaniny

Multiaxiální tkaniny jsou produkty vyráběné na šicích strojích, kde jsou polyesterovými nitěmi sešita vlákna přímého skelného rovingu pod úhly:



Obr. 2.8: Multiaxiální tkanina

- $-45^0/+45^0$ (GBX)
- $-45^0/90^0/+45^0$ (GTX)
- $-45^0/+45^0/0^0$ (GTXO)
- $-45^0/90^0/+45^0/0^0$ (GQX)

Tyto tkaniny je možné kombinovat s rohoží ze sekaných skelných vláken o délce 50 mm (GBXM, GTXM), která je na povrch multiaxiálních produktů našívána. Výhodou spojení vrstev prošitím je lepší tvarovatelnost vícevrstvého polotovaru, rychlejší smáčení vláken a nepřítomnost zbytků vazebného prostředku na povrchu vláken.

Multiaxiální tkaniny umožňují produktivní výrobu laminátu s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi v požadovaném směru.

Multiaxiální tkaniny vyrobené ve společnosti Saertex. Tkanina je složena zjednosměrných pásek vyrobených z uhlíkových vláken AS4 fy Hexcel. Pásky jsou prošity tak, aby měly volnější strukturu a orientaci vláken $\pm 45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/0^\circ/0^\circ/\pm 45^\circ$. Při počtu 9-ti vrstev je celková tloušťka multiaxiální tkaniny 0,13 mm. Multiaxiální tkaniny jsou natvarovány a prošity dvěma jehlami do konečné 3D struktury spolu s pěnou ROHACELL. Vzniklý suchý preform je schopen udržet přesný tvar i během manipulace a je vložen do formy, kde je pomocí technologie CAPRI (Controlled Atmospheric Resin Infusion) impregnován epoxidovou pryskyřicí HexFlow VRM34, by Hexcel. [10]

2.2 Úprava povrchu uhlíkových vláken

Vyrobená uhlíková vlákna jsou podobně jako vlákna skleněná dodatečně upravena. Účelem je:

- odstranit z povrchu vláken látky bránící (sizing) kontaktu s matricí.
- omezit další adsorpci plynů na povrch vláken
- zvýšit reaktivitu povrchu vůči vazebným prostředkům a matricím
- chránit vlákna před vzájemnou abrazí (uhlíková vlákna jsou křehčí než skleněná)

Jestliže reaktivita ploch aromatických rovin je malá, jejich hrany a rohy jsou vysoce reaktivní a vážou kyslík, oxidy uhlíku, karboxylové kyseliny, karbonylové a hydroxylové a případně aminové a kyanové skupiny. Vlhkost a plynné látky mohou způsobit potíže při výrobě kompozitu, protože jsou pouze fyzikálně vázány a během vytvrzování matrice za vyšších teplot se odpařují za vzniku mikroskopických plynových bublinek obalujících vlákna.

Nejčastěji se vyrobená vlákna chrání polymerními povlaky na bázi epoxidů nebo polyamidů, jejichž účelem je zabránit adsorpci látek a zároveň poskytnout vláknům ochranu před abrazí. U vláken s aromatickými rovinami rovnoběžnými s povrchem (standardní vlákna z PAN) je účelně reaktivitu povrchu zvýšit a povrch vláken zdrsňit. Nejběžnější je mokrá způsob, spočívající v čistě chemickém působení oxidačních látek

(HNO₃, chromová kyselina, chlornatan sodný) nebo elektrochemický způsob, spočívající v anodické oxidaci vláken v elektrolytech, např. v sulfidu amonném. U vláken spříznivější mikrotexturou lze aplikovat i suchý proces - termickou oxidaci.

Nejnověji se používá kontinuální úprava studeným vysokofrekvenčním plazmatem, které je vytvářeno reaktorem pracujícím při frekvencích střídavého proudu okolo 15 MHz. Podle použitého plynného prostředí (kyslík, argon, čpavek a další látky, např. monomery) je dosahováno různých účinků:

- leptání a zdrsňování povrchu, doprovázené často i poklesem pevnosti (při použití kyslíku)
- očištění vlákna, které vede k zvětšení povrchové energie a ke zlepšení smáčivosti pryskyřicí
- implantace funkčních skupin na očištěný povrch (při použití čpavku jde o aminové skupiny)

Pro epoxidové matrice se osvědčilo plazmové zpracování s připouštěním čpavku, (případně atmosférou směsi čpavku a argonu), které vede k téměř dvojnásobnému zvýšení smykové pevnosti rozhraní vlákna a matrice. Plazmovou polymerací lze vytvořit na uhlíkovém vlákně dobře ulpívající polymerní (např. polypropylenový) povlak a tak dosáhnout afinity k polymerní (např. polypropylenové) matici. Často je po implantaci chemických skupin na povrch vlákna pozorováno zvětšení jeho tahové pevnosti, které je vysvětlováno zahojením povrchových defektů vytvářeným povlakem.[8]

2.3 Mechanické zkoušky - pevnost

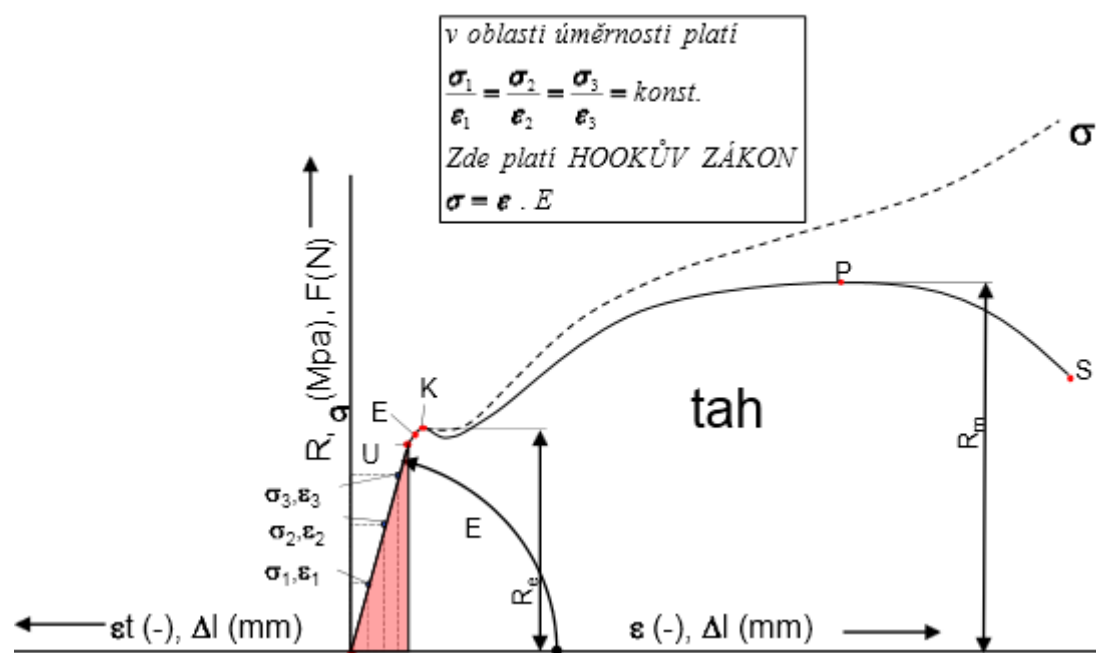
Pro co nejlepší a nejpodrobnější zjištění vlastností daných typů se zkouší uhlíková vlákna ve třech základních směrech určených podle orientace rovingu. Prováděny jsou zkoušky tahem, tlakem a 3-bodovým ohybem. Mezi hlavní výhody uhlíkového vlákna patří jeho nízká hmotnost vůči jiným materiálům.

2.3.1 Tah

Pokud je velké relativní prodloužení, tak je vyvolané normálové napětí menší než mez pružnosti σ_E , jedná se o **pružný materiál**. Má-li materiál mez pružnosti blízko

meze pevnosti, jedná se o **křehký materiál**. Křehkost často souvisí s velmi dobrou pružností (žiletka) nebo s velkou tvrdostí (nože, pilníky). Tyto charakteristiky lze dobře vyčíst z tzv. deformační křivky.[11]

Hookeův zákon



Obr. 2.9 : Pracovní diagram modulu pružnosti a poměrného prodloužení [30]

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (1)$$

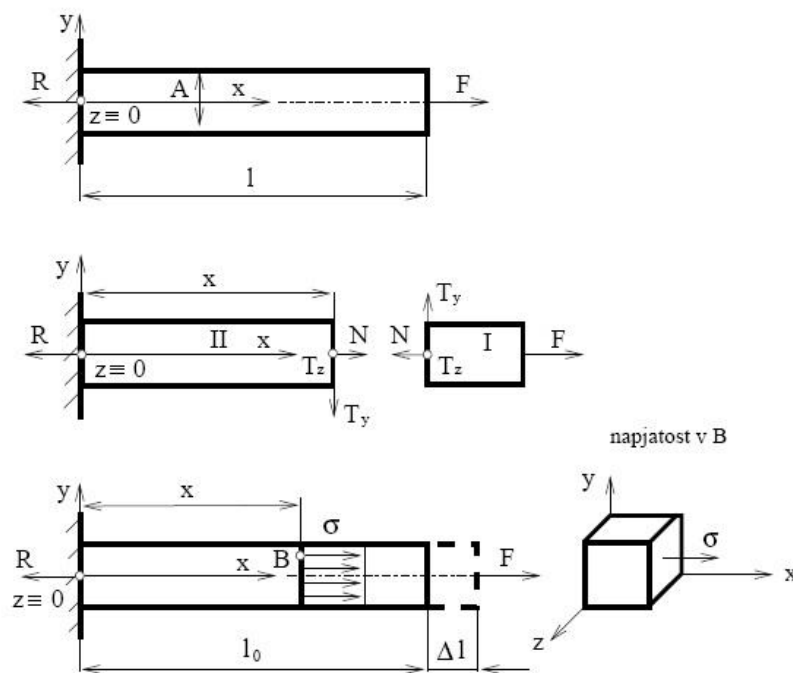
$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \Rightarrow \Delta l = \frac{F \cdot l_0}{S \cdot E} \quad (3)$$

E.....modul pružnosti pro materiál v tahu[J/mm²]

σ napětí[Pa]

ε poměrné prodloužení [%]



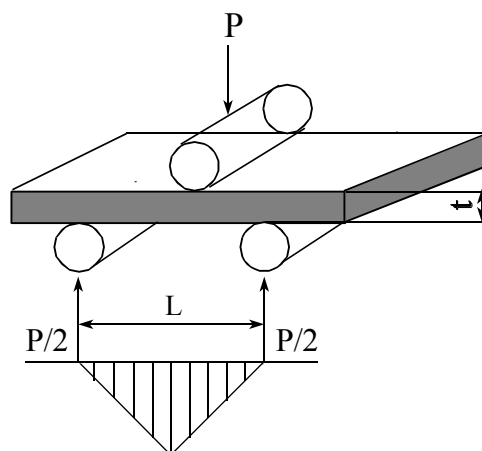
Obr.2.10 :Tah a tlak

Výpočet pro sílu:

$$p = \frac{F}{S} \quad (4)$$

$$F = p \cdot S \quad (5)$$

2.3.2 Tříbodový ohyb



Obr. 2.11 : Uložení vzorečku u zkoušky tříbodovým ohybem - schéma

Ze schématu je možné vyčíst, co jsou které hodnoty:

t ...tloušťka zkoumaného materiálu [mm]

L ... rozpětí dvou podpěr[mm]

P ...tlak[MPa]

2.3.3 Typické vlastnosti uhlíkových vláken

Vysokopevná

Hustota $1,7\text{g/cm}^3$

Pevnost v tahu 3000-6000MPa

E modul 250-300 GPa

Protažení 1,0 %

Vysokomodulová

Hustota $1,9\text{ g/cm}^3$

Pevnost v tahu 3000-4500 MPa

E modul 400-700GPa

Protažení 0,5 %

Vzhledem k jejich vysokému modulu pevnosti a relativně nízké váze, ale vysoké ceně, se uhlíková vlákna používají na špičkové aplikace, převážně v kombinaci s epoxidovými pryskyřicemi jako matricí pro lodě, sportovní potřeby, závodní automobily, v letectví a kosmickém průmyslu.

Přírodní vlákna

Vlákna z obnovitelných zdrojů, zejména na bázi celulózy – sisal, len, konopí, bavlna, juta nalézají uplatnění jako levnější alternativa skleněných vláken zejména v tzv. třetím světě, ale v poslední době jsou stále více využívána při výrobě pevnostně méně náročných a přitom lehkých dílců např. v interiérech automobilů a jiných dopravních prostředků. Používají se ve formě pramenců nití, netkaných materiálů – rohoží nebo tkanin.

Čedičová (bazaltová) vlákna

K přírodním vláknům lze řadit i minerální vlákna, kde se zatím nejvíce rozšířila vlákna čedičová (bazaltová), která se vyznačují vysokými mechanickými pevnostmi, chemickou a teplotní odolností.

Povrchové rohože (vlieše)

Jedná se o tenké, nízkogramážní (6-80 g/m²) rohože se sekanými nebo kontinuálními jemnými vlákny, která jsou skleněná nebo syntetická, pojená dle typu a účelu použití rychle nebo pomalu rozpustnými pojivy v matrici. Jsou používány jako povrchové vrstvy kompozitních výrobků s vysokým obsahem pryskyřice (až 90 %) s cílem zlepšit kvalitu povrchu nebo rubové strany dílce a zvýšit korozní odolnost kompozitu vytvořením tzv. nárazníkové vrstvy. Někdy se používají na vyztužení gelcoatu nebo topcoatu.

Pojiva (matrice)

Jako pojivová složka polymerních vláknových kompozitů se užívají jak termosetické pryskyřice, které během vytvrzovacího procesu vytváří nerozpustnou a netavitelnou zasíťovanou strukturu, tak termoplasty – různé typy tzv. konstrukčních polymerů.

Termosetické pryskyřice

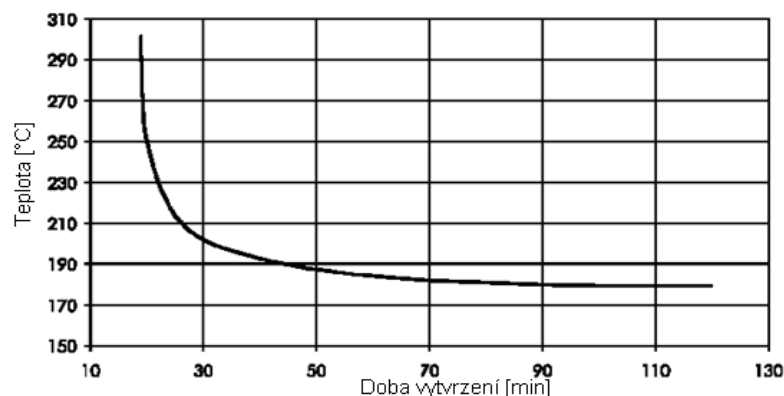
Nejužívanějšími jsou nenasyčené polyesterové pryskyřice, vinylestery a epoxidové pryskyřice.

Polyesterové pryskyřice

Podle své chemické struktury se dělí na ortoftalové, izoftalové a tereftalové typy, v tomto pořadí obecně stoupají jejich mechanické vlastnosti, teplotní a chemická odolnost. Ještě lepších vlastností lze dosáhnout použitím vinylesterových pryskyřic s teplotní odolností až do 160°C a dlouhodobou chemickou odolností vůči většině agresivních látek – např. kyselinám, hydroxidům a rozpouštědlům. Monomerem a síťujícím činidlem je u těchto pryskyřic styren. Pryskyřice se pro zlepšení zpracovatelských podmínek dodávají i s přídavkem urychlovačů, speciálních voskových složek pro snížení odparu zdraví škodlivého styrenu. Případně s přídavkem tixotropních složek, upravujících viskozitu a snižujících stékání pryskyřice ze svislých stěn. Pro povrchové vrstvy, dodávající výrobku povětrnostní a chemickou odolnost a zajišťující estetický efekt se používají speciální polyesterové pryskyřice obsahující různá aditiva, zejména barevné pigmenty, UV stabilizátory a další složky.

Epoxidové pryskyřice

Mezi ně patří v ČR vyráběný Lukosil M 130. Lze vytvrdit teplotou bez použití katalyzátoru. Při pokojové teplotě vytváří Lukosilnelepivý, pružný, částečně mechanicky a chemicky odolný film. Tepelným vytvrzením se dosáhne zvýšení tvrdosti a výrazného zlepšení mechanické a především chemické odolnosti. Film se stává odolným vůči působení organických rozpouštědel a stabilizuje se pro trvalé tepelné namáhání. Zasychá při pokojové teplotě, je hydrofobní a také odolný proti povětrnostním podmínkám a UV záření.[14]



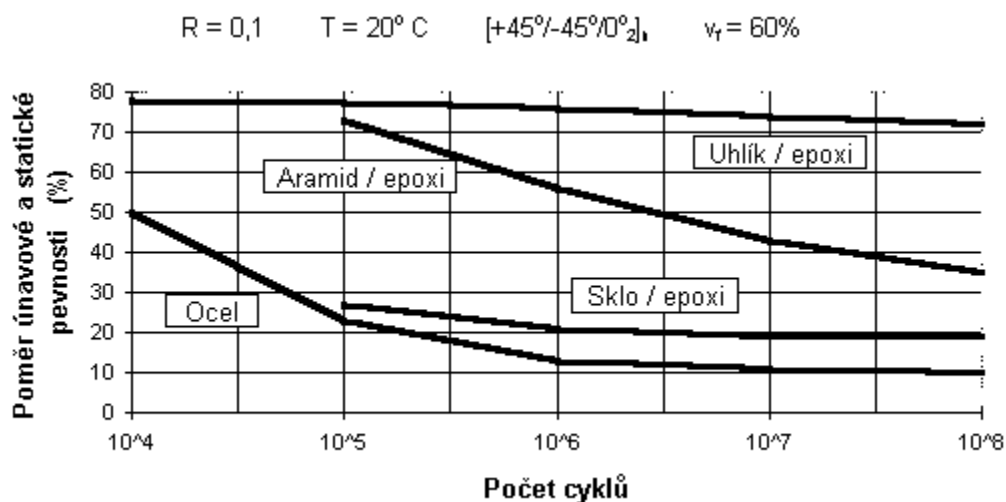
Obr. 2.12: Graf vytvrzování Lukosilu M 130 [24]

2.4 Sport a uhlíková vlákna

Inovace nových materiálů se projevila i ve směru používaných materiálů při výrobě rámců jízdních kol i ostatních cyklokomponent. Ve velké míře se v současné době využívají karbonové kompozity a to zejména z důvodu jejich vlastností.

Například firma Duratec ve své dílně vyrábí kompozitové monokoky použitím unikátní technologie AFCF vyvinuté ve Vývojovém centru DURATEC a používá vysokomodulární grafitizovaná vlákna (HM – **H**igh **M**odulus). Vysoký modul vláken znamená výrobu z jemnějších uhlíkových vláken s vyšším "Youngovým modulem" - vyšší tuhost a pevnost. Čím vyšší modul, tím vyšší cena materiálu a tím lepší mechanické vlastnosti. [6]

Výhody použití uhlíkového kompozitu: nízká hmotnost, vysoká pevnost, vynikající absorpční vlastnosti rázů, vysoká životnost, velmi příznivá únavová charakteristika (viz obr. 2.13), velmi kompaktní a atraktivní design vycházející ze skladby a typu použitých vláken.



Obr. 2.13: Únavové chování kompozitů[29]

2.4.1 Horské kolo

Výběr materiálu pro jízdní kolo má svá specifika. Výše uvedené výhody lákají k volbě kompozitu, ale běžný uživatel by měl znát i nevýhody kompozitů a to *neopravitelnost a neservisovatelnost*. Klienti společnosti DURATEC, vyrábějící cyklo rámy z uhlíkových hmot, jsou zvyklí na „fulservice“. Repasování rámu po pár letech ježdění není u této firmy novinkou. V případě volby kompozitu tento servis ale zajistit nelze. S tím souvisí i jeho neopravitelnost. V případě nehody, pádu atd. může dojít k vytvrzení vláken, lomu trubky či jinému porušení struktury, kterou firma není schopná opravit. [6]



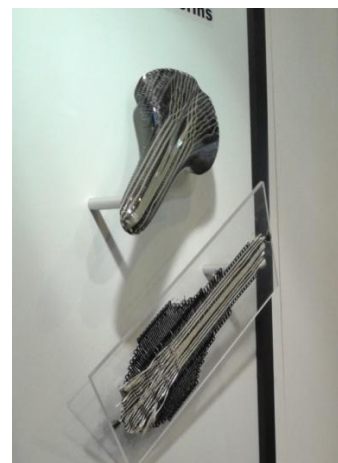
Obr. 2.14: Celouhlíkový rám horského kola POLYGON 3.0 CX

S časem se mění i vyspělost technologií všeho druhu a již 2 roky je možné si tyto uhlíkové díly dát opravit. Oprava je ruční, nezacelí díru do takových vlastností jako z výroby, ale pomůže.

Rozdíly v ceně karbonových rámu jsou velké. Pohybují se od 18tis. Kč až třeba ke 100 tis. Kč. Od počátku výrobního procesu je možné je odlišovat. Rozdíl najdeme již v samotném výrobním materiálu kompozitu, který ovlivňuje výsledné jízdní vlastnosti. Použití kompozitu od renomovaných značek např. Hexcel či Toray (Japonsko), kteří garantují certifikaci materiálu, samozřejmě zvyšuje cenu, ale přináší garanci jeho kvality a normou předepsaných parametrů. Cena materiálu je též závislá na technických požadavcích na tzv. modulu pružnosti daného materiálu. Jak již bylo uvedeno, čím vyšší nároky, tím vyšší cena. Rozdíl v ceně může být způsoben též zvolenou technologií výroby karbonových rámu, která se neustále vyvíjí. Náklady na vývoj se hradí z prodeje výrobků a tím dochází k ovlivnění ceny finálního výrobku.



Obr.2.15: Výroba uhlíkových rámu [2]



Obr. 2.16: Karbonové
cyklo sedátko

Ve vývoji se jedná o zkoumání výrobní technologie a vývoj technického designu výrobku. Požadovaná pevnost a tuhost konstrukce rámu závisí na zkušenostech konstruktéra, který dimenzuje rám a tím ovlivňuje jeho vlastnosti zejména skladbou a počtem stříhů na 1 ks rámu. Pro lepší představu lze uvést, že model Cult CR3 se skládá cca z 200 stříhů. Snížením počtu stříhů dochází ke snížení spotřebovaného materiálu, ale zároveň toto snížení ovlivní i výsledné mechanické - jízdní - vlastnosti.

Počet stříhů snižuje i časové nároky na položení stříhů a tím zlevňuje výrobu. Dalšími faktory ovlivňujícími cenu výrobku může být opakovatelnost použití formy a dále pak klasické ukazatele nákladů jako je sériovost, cena pracovní síly, režie provozu a dalších. [16]



Obr.2.17: Hliníková slitina 7020T6 a uhlíková vlákna - karbonové kompozity [5]

2.4.2 Lyže

Výrobci lyží dnes nepoužívají jen dřevo a krycí lamináty. Pro výrobu lyží i pro prvky jádra se dnes používá i karbon. Některé designové a drahé páry lyží jsou zhotoveny jen z karbonu bez dřeva a pěny, z které se nejčastěji vyrábí lyže pro „turisty“.

Uhlíkovými vlákny v lyžích lyže dostává nový rozměr, je tužší a minimalizuje se také krut z tlaku podélné osy. Uhlíková vlákna také bezvadně tlumí nerovnosti a na rovné pistě pak naopak drží stopu a zařezává se do ledu, tak jak by měla. Lyže z těchto vláken váží kolem jednoho kilogramu i se skluznicí a hranami.

Výpočty parametrů použitého materiálu – počty uhlíkových vrstev, úhel překřížení vláken a jejich vzájemné uspořádání vytváří každý výrobce lyže a jednotlivé vrstvy jsou pak tvrzeny pod tlakem v umělém vakuu. Výpočty výrobci lyží dodávají i dodavatelé rovingu či multiaxiálních tkanin, kde jsou již úhly vláken dané od výroby tkanin.

U levnějších lyží je použit jen design karbonu, který není z uhlíkových vláken, ale je to jen jeho imitace. Dělá se většinou z polypropylenových hmot.



Obr. 2.18 : Sjezdové lyže od švýcarské firmy Volant

3 Experimentální část

K výrobě kompozitních materiálů byly využity laboratoře Textilní fakulty liberecké univerzity na katedře materiálového inženýrství. Materiály na výrobu vzorků k analýze byly poskytnuty firmami – výrobci jednotlivých složek, jako sponzorské dary.

LukosilM130 na testování před samotnou výrobou kompozitu poskytly Lučební závody Kolín. Dvousložkovou matrici Huntsman pak dodala firma Huntsman ČR. Uhlíkový roving na cívce dodal výrobce TENAX.



Obr. 3.1: Dvousložková matrice firmy Huntsman

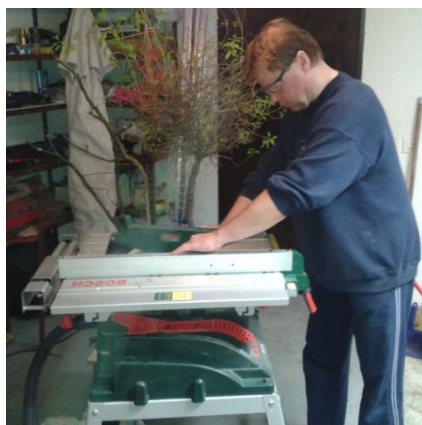
3.1 Výroba vrstvených kompozitních materiálů

Pro výrobu kompozitních desek na naše vzorky byl zvolen uhlíkový roving od firmy TENAX s jemností 1600 [tex] typ STS40 F13 a dvousložková matrice Huntsman. První složkou byl XB 3585 Resin (dále už jen jako Resin)- pryskyřice a druhou byl toxický XB 3458 CH Hardener (dále jen Hardener) – tvrdidlo.

Pro výrobu kompozitů a vzorečků bylo potřeba:

- krycí igelitová podložka k ochraně pracovní plochy

- pečící papír
- štětec
- váleček
- kovové desky jako forma
- šrouby a maticky
- nůžky na uhlíková vlákna
- kovové desky dané velikosti
- pec HS122A
- okružní pila Bosch
- vysavač Bosch
- digitální váha
- posuvné měřítko
- pravítko
- úhloměr
- plastové kelímky na smíchání dvousložkové matrice



Obr. 3.2: Okružní pila Bosch a pec HS122A

a s pomůckami splňujících ochrannou funkci, jako jsou:

- ochranné rukavice
- pracovní plášť
- ochranné brýle
- respirátor

Příprava dvouvrstvé, čtyřvrstvé a šestivrstvé plochy z výše uvedeného rovingu na kovové desky 220 x 220 mm trvala na tři tyto desky ze začátku 6 hodin. Ve druhém kole na další vzorečky trvala příprava o hodinu méně a do třetice už jen 4 hodiny.

Roving byl kladen jeden vedle druhého pod úhlem 60-ti stupňů. Nalepování pramenů na samolepící pásku po obvodu 3 mm tlusté kovové desky bylo zakončeno stříháním nůžkami na karbon a to za přesahem kovové desky.



Obr. 3.3: Pečící fólie, kovové desky a roving na deskách

Po přípravě rovingu na vrstvy byla namíchána dvousložková matrice v poměru 100:19.100 dílků Resinu a 19 dílků Hardeneru bylo zamícháno v plastové nádobce (kelímek od jogurtu). Poměr dílků vážený na digitální váze jako gramy.

Po promíchání byla nanесena nalitím matrice na připravené vrstvy z rovingu. Vždy postupně nejprve na desku s dvouvrstevným rovingem. Mezi 1. vrstvou rovingu a kovovou formou byla vložena pečící fólie, na kterou se až pak lepil roving na samolepící tenký pruh po obvodu. Po ručním protlačení a rovnoměrném rozprostření matrice po ploše rovingu byla položena pečící fólie a na ni kovová 2. část formy, která byla stažena k 1. části čtyřmi šrouby s maticemi umístěnými v rohách formy.



Obr. 3.4 : Nanášení matrice na rovingové vrstvy



Obr. 3.5: Upečená matrice s uhlíkovými vlákny = uhlíkový kompozit

Po stlačení formy k sobě a dotažením matic ke šroubům byla spojená forma dána do pece a pečena na 80 °C 10 minut a 20 minut na 100 °C. Po uplynutí dané doby, která byla nastavena, na časovém spínači pece, byla pec otevřena a desky byly prouděním studeného vzduchu v laboratoři ochlazeny.

Z kovových desek byly vyjmuty vytvořené uhlíkové kompozity a na okružní pile nařezány na vzorečky dle daných rozměrů k testování mechanických vlastností.



Obr. 3.6: Vzorky uhlíkových kompozitů

Rozměry vzorků:

- 3 – point bendingna DMA 48 x 10 mm
- 3 – point bending na dynamometru 40 x 25 mm
- Charpy test 77 x 10 mm

Výpočty pro vyjádření výsledků

- Pevnost v ohybu – maximální napětí v ohybu, které vzorek snese během zkoušky.
- Napětí v ohybu – napětí vnějšího povrchu vzorku uprostřed rozpětí podpěr, počítá se dle vztahu:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (6)$$

kde F [N] je zatěžující síla, L [mm] je rozpětí podpěr, b [mm] je šířka zkoušeného vzorku, h [mm] je tloušťka vzorku.

- Modul pružnosti v ohybu E – vyjádřený v MPa, získáme z oblasti namáhání v níž je lineární závislost průhybu na zatížení, přičemž záleží na geometrii vzorku. [15]

$$E = \frac{FL^3}{4Xbh^3} \quad (7)$$

Kde X [mm] je průhyb, F [N] je zatěžující síla, h [mm] je tloušťka tělesa, b [mm] je šířka tělesa.

3.2 Testování kompozitních materiálů

Při testování kompozitních materiálů byly zkoumány mechanické vlastnosti dvouvrstvého, čtyřvrstvého a šestivrstvého uhlíkového kompozitu o úhlu vláken šedesát stupňů.

3.2.1 Zkouška 3 – point bending na dynamometru

Postup zkoušky

Zkouška třibodovým ohybem byla prováděna na vzorcích o velikosti 40 x 10 mm a různých tloušťkách na trhacím přístroji TIRA TEST 2300.

Zkouška 3PB ohybem byla prováděna na trhacím přístroji TIRA TEST 2300 od firmy LABORTECH, ke kterému bylo připevněno pomocné zařízení potřebné k 3PB ohybu. Jedná se o přístroj, jehož výhodou je připojení k počítači, který ihned při provádění zkoušky zaznamenává a vyhodnocuje získaná data.

Při zkoušce třibodovým ohybem je zkušební vzorek podepřen jako nosník dvěma podpěrami a prohýbán působením konstantní rychlostí trnem, působícím uprostřed podpěr tak dlouho, dokud hloubka průhybu nedosáhne požadované velikosti.

Ohybová zkouška také pomáhá určit modul pružnosti E u materiálů, u kterých nelze modul E zjistit z tahových či tlakových zkoušek s dostatečnou přesností.

Způsob přípravy zkušebních vzorků, jejich rozměry, rychlost zatěžování, rozměry podpěrných i zatěžovacích trnů a další náležitosti ohybových zkoušek byly použity z příslušných norem ČSN EN ISO 178 (640607).

Po nastavení počátečních podmínek přístroje bylo možno testovat vzorky o velikosti 25 x 100 mm. Na připojeném počítači se softwarem Lab. Test. verze 3.16.1962, který ihned zaznamenával naměřené hodnoty, bylo možné sledovat také samotný průběh zkoušky v grafickém znázornění.

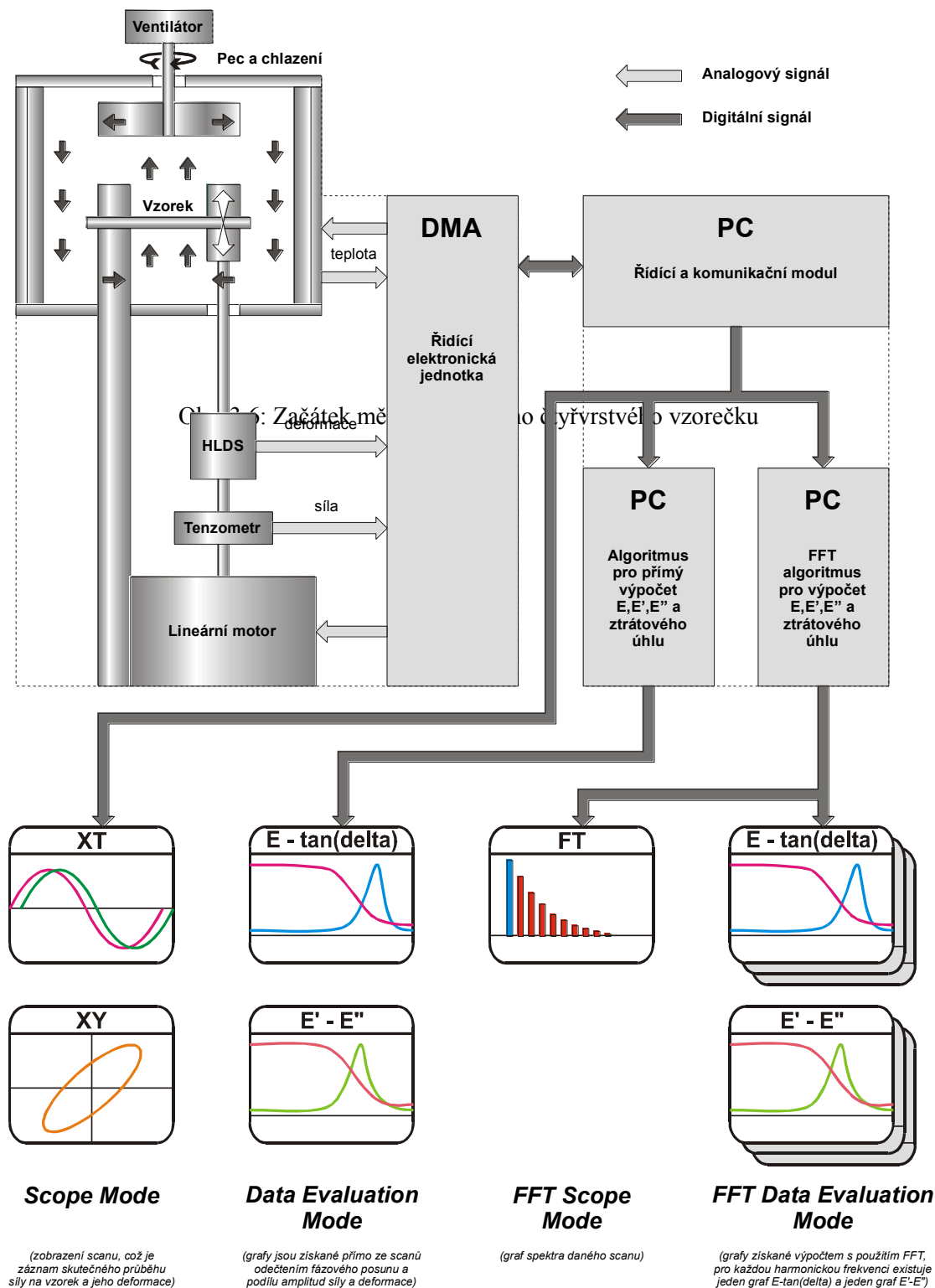
Kromě počátečních podmínek bylo nutno ke každému novému vzorku doplnit údaje o jeho tloušťce, jež je zapotřebí k výpočtům modulu pružnosti ze vztahu.

3.2.2 Zkouška 3 – point bending na dynamicko – mechanické analýze (DMA)

Princip dynamicko - mechanické analýzy (DMA) spočívá v mechanickém namáhání vzorku definovanou silou (resp. napětím, stress) a měřením jeho deformační odezvy (strain) za různých podmínek (např. s měnící se teplotou). Vyhodnocením získaných průběhů napětí a deformace byly získány závislosti modulu pružnosti a ztrátového úhlu na teplotě a dále i na čase, frekvenci působící síly, velikosti deformace aj. [28]

Dynamicko - mechanická analýza je jedna z nejcitlivějších technik schopná charakterizovat a interpretovat mechanické chování materiálu. Podstata metody DMA je založena na sledování viskoelastické odezvy materiálu podrobeného malému oscilačnímu napětí. Metoda odděluje viskoelastickou odezvu materiálu na dvě komponenty modulu (E^*): reálná část, která reprezentuje elastický modul (E'), a imaginární část, která představuje útlumovou nebo viskozitní složku (E''). Celkový tzv. komplexní modul je $E^* = E' + iE''$. Tato separace měření do dvou komponent popisuje dva nezávislé procesy uvnitř materiálu: elasticitu (vratná složka) a viskozitu (ztrátová, disipační energie). [27]

Blokové schéma funkce DMA DX04T

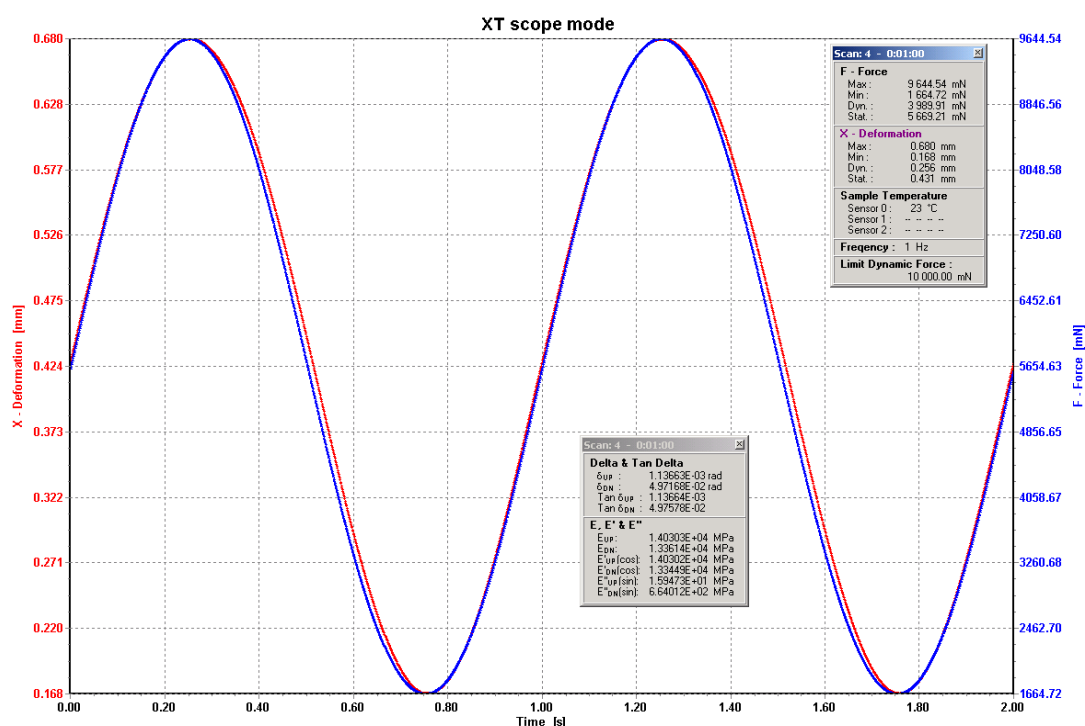


Obr. 3.7: Schéma

Pro měření dynamicko – mechanických vlastností kompozitů tříbodovým ohybem (3 – point bending) byl použit přístroj DMA DX04T s odpovídajícím typem čelistí.

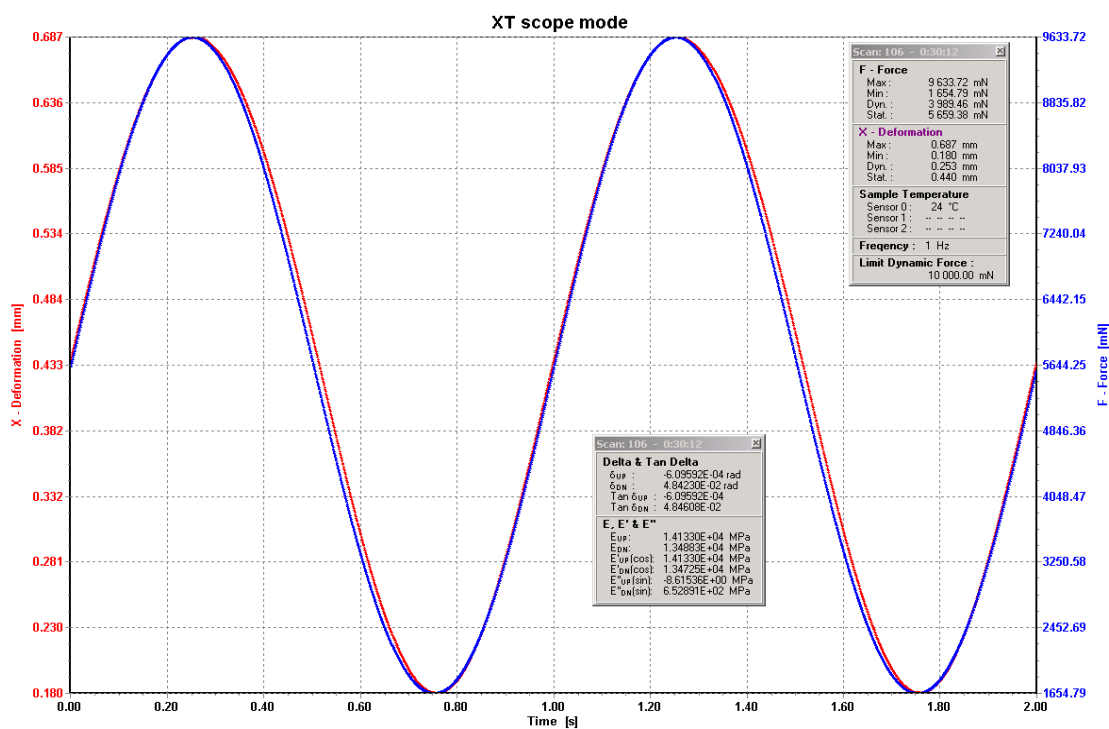
Na obrázku 3.8 začátek prvního osciloskopického modu, který ukazuje skutečné průběhy síly a deformace na vzorku.

Zkouška byla prováděna u vzorků velikosti 48 x 10 mm. Od každého typu materiálů byly testovány 3 vzorky v podélném směru a tři vzorky v příčném směru, z nichž vždy všechny při frekvenci 1 Hz.



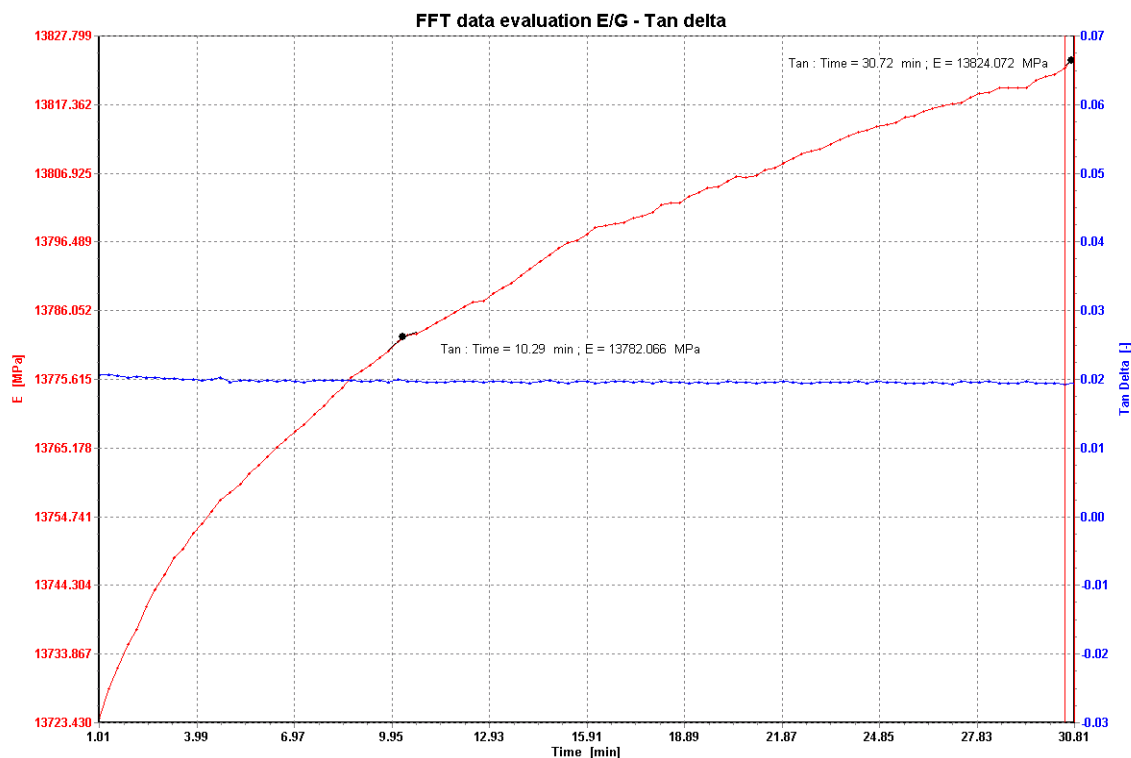
Obr. 3.8: Začátek měření podélného čtyřvrstvého vzorečku

Obrázek 3.9 na následující straně znázorňuje konečné měření průběh sil a deformaci na čtyřvrstvé vzorku. Testování trvalo 30 minut a neprokázala se žádná deformace.



Obr. 3.9: Konec měření podélného čtyřvrstvého vzorku

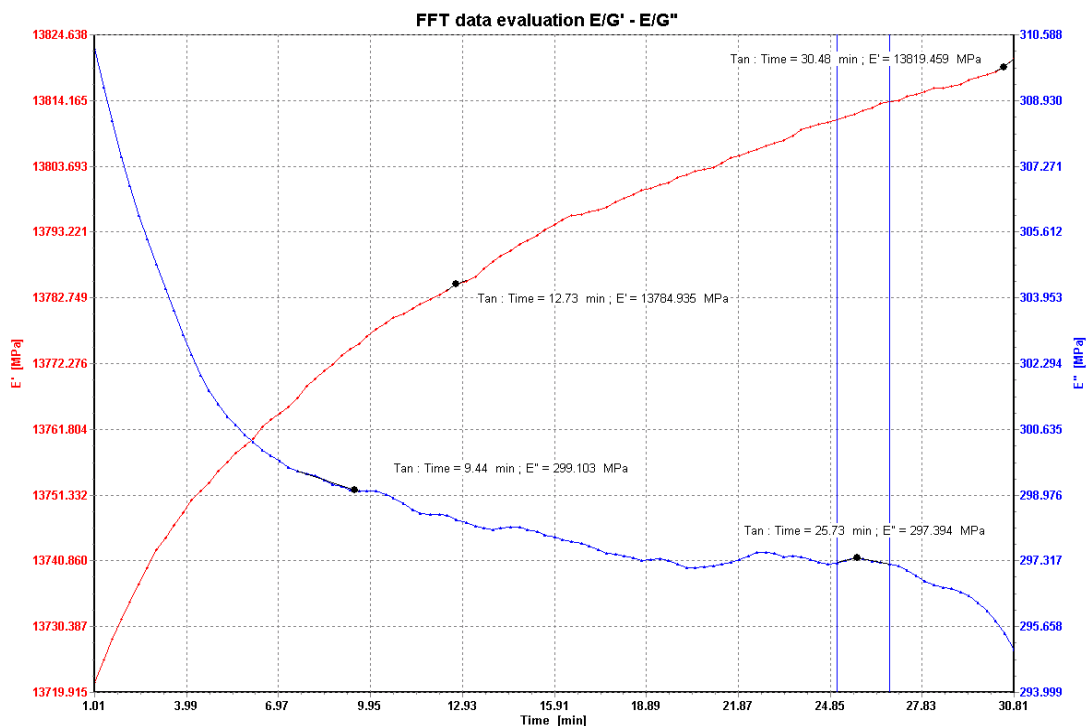
V DMA grafech jsou modrou barvou značeny křivky síly a červenou barvou deformační modul X . Jakmile by vypadl vzorek nebo vznikla vada a vzorek by praskl, přístroj DMA by zobrazil na křivce grafu zub – nepřesnost/nerovnost. K výpadku nedošlo, proto je křivka grafu hezky plynulá.



Obr. 3.10: Graf průběhu modulu pružnosti a ztrátového činitele

V obrázku 3.10 je znázorněna závislost modulu pružnosti a činitele ztrát na teplotě pro první harmonickou frekvenci, byl vypočten ze scanů pomocí algoritmu. Celkem je možné zobrazit grafy pro všech 25 harmonických frekvencí a statistickou složku a to nejen pro modul pružnosti, ale i pro působící sílu a pro deformaci vzorku.

Závislost imaginární a reálné složky modulu pružnosti je také zobrazena v obrázku číslo 3.11. Kde je součástí FFT i jedna ze selektivních filtrací neharmonických složek, která vede k potlačení šumu.



Obr. 3.11: Graf závislosti reálné a imaginární složky modulu pružnosti na čase

Pozn.: Všechna získaná data jsou umístěna na přiloženém CD, kde jsou i soubory se základními statistickými údaji a grafy.

Postup zkoušky:

U vzorků o velikosti 48 x 10 mm byla nejdříve změřena jejich tloušťka a poté byly upnuty do čelistí přístroje. Na počítači (program DMA Grapher) propojeném s přístrojem byly zadány tyto vstupní hodnoty:

- předpětí: 0,010 mm
- konstantní deformace (měření síly, resp. napětí): 0,020 – 0,750 mm
- frekvence: 1 Hz
- upínací (činná) délka vzorku – 30 mm
- šířka vzorku: 10 mm
- tloušťka vzorku: různá, dle typu vzorku

Po nastavení vstupních parametrů se na čelisti s upnutým vzorkem byla přiklopena horkovzdušná pec s dynamickou atmosférou, která slouží pro přesný ohřev a chlazení díky umístění regulačního termočlánku přímo ke vzorku. Bez jejího přiklopení by nebylo možné přístroj spustit – nedalo by se testovat.

Na počítači bylo příslušnou ikonou spuštěno měření, které trvalo 30 minut, a po tomto čase se měření vždy muselo ukončit. Po jeho skončení se odklopila pec a vyndal vzorek. Takto probíhalo testování i u ostatních vzorků, kde se u každého kompozitu měřilo působení sil na oba dva směry. Teplota byla konstantní 21,5°C.



Obr. 3.12: Zařízení pro měření dynamicko – mechanické analýzy Obr. 3.13: Upnutí vzorku v přístroji

3.2.3 Charpyho kladivo

Na přístroji Labortechlabtest CHK50J – Charpyho kladivo bylo testováno pět vzorků jednoho typu (dle počtu vrstev) a každého směru. Testováno dle normy ČSN EN ISO 179-1.

Rázová energie spotřebovaná k přeražení zkušebního tělesa bez vrubu, vztažená na původní průřez zkušebního tělesa. Zkušební tělesa nesmí být zkroucená, musí mít vzájemně kolmé rovnoběžné dvojice povrchů. Povrchy a hrany nesmí obsahovat vrypy, nerovnosti, propadliny a přetoky. U zkušebních těles je nutné kontrolovat splnění výše uvedených požadavků vizuální kontrolou rovnosti a kolmosti hran, rovnosti povrchů a měření mikrometrem. Zkušební tělesa, která vykazují měřitelné nebo pozorovatelné

odchylky od jednoho nebo více uvedených kritérií, se vyřadí nebo se musí před zkouškou obrobit na správnou velikost a tvar.

Zkouška se provádí ve stejném standartním prostředí jako kondicionace, pokud není zúčastněnými stranami dohodnuto jinak, jako např. v případě zkoušení při zvýšených či snížených teplotách. Změří se tloušťka h a šířka b ve středu každého zkušebního tělesa s přesností na 0,02 mm. Zkontroluje se rozpětí podpěr zkušebního tělesa a v případě potřeby se rozpětí nastaví dle tabulky norem v návodu k přístroji.[31]

Zkontroluje se, zda je zkušební stroj schopen provádět zkoušku předepsanou rázovou rychlostí a zda se nalézá ve správném rozsahu absorbované energie W , který musí být mezi 10 % a 80 % energie E , která je k dispozici při rázu. Pokud tomuto požadavku vyhovuje více kyvadel, použije se rázové kyvadlo s nejvyšší energií.

Rázové kyvadlo se zvedne do předepsané výšky a zajistí se. Zkušební těleso se umístí na podpěry stroje tak, aby břit rázového kyvadla dopadl do středu zkušebního vzorku.

Rázové kyvadlo se uvolní. Zaznamená se rázová energie absorbovaná zkušebním tělesem a zahrnou se nezbytné korekce na ztráty třením, atd.[31]

U zkušebních vzorků se mohou objevit čtyři typy přeražení, popsané následujícími písmennými kódy:

C = úplné přeražení; přeražení, při kterém je zkušební těleso rozděleno na dva nebo více kusů

H = kloubové přeražení; neúplné přeražení, kdy obě části zkušebního tělesa drží pohromadě pouze tenkou obvodovou vrstvou v podobě kloubu bez zbytkové tuhosti

P = částečné přeražení; neúplné přeražení, které nesplňuje definici kloubového přeražení

N = nepřeraženo; případ, kdy nedojde k přeražení a zkušební těleso je pouze ohnuto a protlačeno mezi podpěrami, což je někdy doprovázeno zbělením zkušebního tělesa



Obr. 3.14: Kyvadlo Charpyho kladiva



Obr. 3.15: Labortechlabtest CHK50J



Obr. 3.16: Foto zkoušených vzorků po rázové zkoušce

Tato energie se vypočítá podle vztahu:

$$E = \frac{E_{\max}}{b \cdot h} \quad (8)$$

kde E [J/mm²] je energie působící při nárazu na vzorek, E_{\max} [J] je konečná energie, kterou tyč naráží na vzorek, b [mm] je šířka vzorku a h [mm] je tloušťka vzorku.

Postup zkoušky:

Princip Charpy testu spočívá v nárazu kladivem na vzorek, kde kladivo provádí pohyb po kruhové dráze. V první fázi bylo zdviženo a upevněno v horní (počáteční) poloze. V nejnižší poloze byl na podpěrky umístěn vzorek o velikosti 77 x 10 mm, na který bylo působeno kladivem, jenž se pohybovalo volným pádem rychlostí asi 3,7 m/s. Kladivo se po výkonu vrací do počáteční polohy. Přístroj Labortechlabtest CHK50J spočítal práci potřebnou k přerušení stálosti vzorečku. Zkušební vzorek byl většinou přelomen nebo praskl.[28]

4 Výsledky a diskuze

Součástí práce jsou i její výsledky a zhodnocení. Kapitola výsledků a jejich popisu byla rozdělena na tři části dle postupu při samotném experimentu.

4.1 Statická 3 – point bending zkouška na dynamometru

V následující tabulce č. 1 jsou zobrazeny průměrné hodnoty síly v ohybu F_{max} [N], napětí σ [MPa], modulu pružnosti E [GPa], šířky b [mm], tloušťky h [mm] Velikost průhybu X [mm] do grafu nebyla přidána z důvodu její nastavené konstantní hodnoty 2 mm.

Tabulka č. 1: Průměrné hodnoty mechanických vlastností vzorků měřených na dynamometru

	F_{max}	σ	E	b	h
2v_podel	16,67	99,75	12428,85	11,12	0,94
2v_pric	29,28	96,97	8446,40	10,64	1,22
4v_podel	52,02	113,37	8099,78	10,69	1,56
4v_pric	76,17	111,40	6568,51	10,76	1,87
6v_pod	283,27	324,93	17318,09	11,54	2,01
6v_pric	114,62	107,94	5228,03	11,18	2,47

Tabulka č. 2: Statistické údaje změření statického 3-bodového ohybu

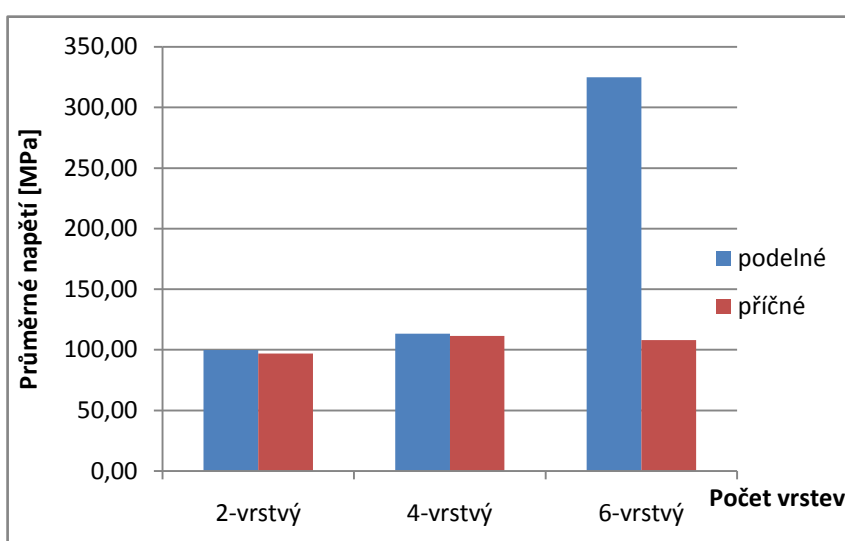
průměr napětí	průměr E	směrodat. odchylka F	směrodat. odchylka napětí	V síly	V napětí	IS F	IS sigma
99,75	12428,85	0,76	37,40	0,05	0,37	0,86	42,32
96,97	8446,40	10,38	27,30	0,35	0,28	11,75	30,89
113,37	8099,78	5,06	30,77	0,10	0,27	5,73	34,81
111,40	6568,51	3,17	13,32	0,04	0,12	3,59	15,07
324,93	17318,09	90,82	92,63	0,32	0,29	102,77	104,82
107,94	5228,03	56,33	79,35	0,49	0,74	63,75	89,79

Statistické údaje průměr napětí, průměr modulu pružnosti, směrodatnou odchylku síly, směrodatnou odchylku napětí, variační koeficient síly i napětí a interval spolehlivosti síly a napětí jsou znázorněny v Tabulce č. 2.

Z průměrného napětí u podélných vzorců i příčných byl vytvořen graf na porovnání a nejlépe se ukázalo kladení vláken v podélném směru tedy s nejmenším odklonem od osy kompozitu. Znázorněno v tabulce č. 3 a obrázku 4.1.

Tabulka č. 3: Průměrné napětí v ohybu

Průměrné napětí [Mpa]	podélné	příčné
2-vrstvý	99,75	96,97
4-vrstvý	113,37	111,4
6-vrstvý	324,93	107,94



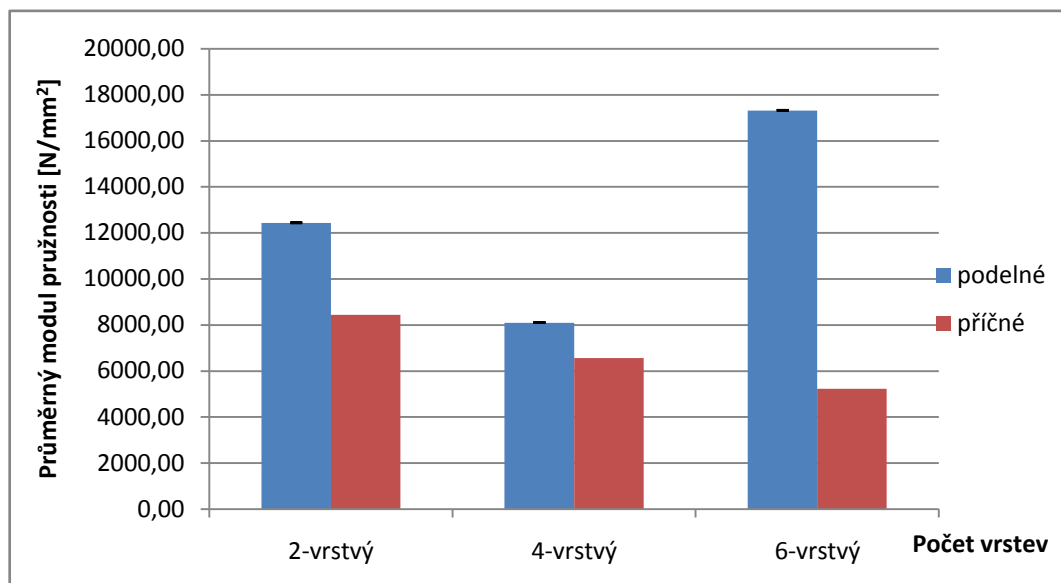
Obr. 4.1: Graf průměrného napětí v ohybu

Pozn.: Všechna naměřená data jsou umístěna na přiloženém CD, kde jsou i soubory se základními statistickými údaji a grafy.

Tabulka č. 4: Průměrný modul pružnosti

Průměrný modul pružnosti [N/mm ²]	podélné	příčné
2-vrstvý	12428,85	8446,40
4-vrstvý	8099,78	6568,50
6-vrstvý	17318,09	5228,03

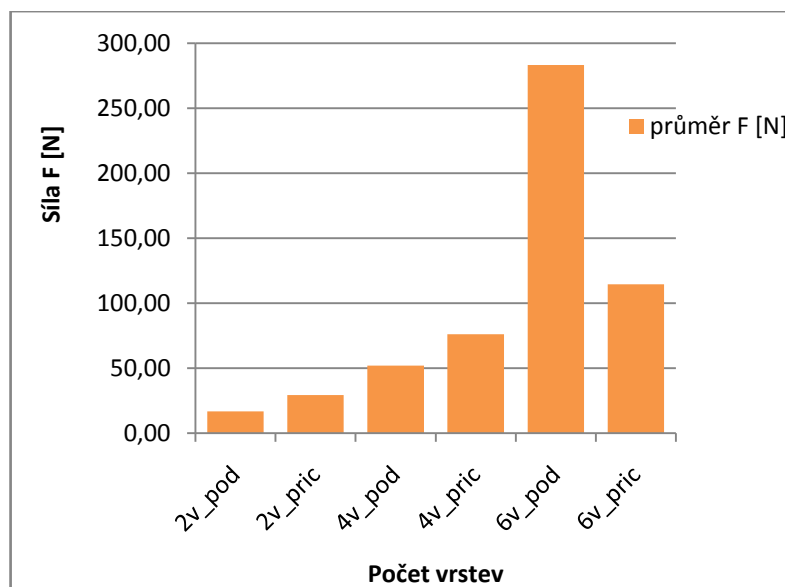
Z Obrázku 4.2 je patrné, že nejpevnější materiálem v ohybu byl šesti vrstvý kompozit v podélném směru.



Obr. 4.2: Graf průměrných hodnot modulu pružnosti

Tabulka č.5: Průměrná síla

	průměr F [N]
2v_pod	16,67
2v_pric	29,28
4v_pod	52,02
4v_pric	76,17
6v_pod	283,27
6v_pric	114,62



Obr. 4.3: Průměrná síla v ohybu

Na obrázku 4.7 můžeme pozorovat největší sílu v ohybu, nejpevnější místo, které bylo u šesti vrstvého kompozitu v podélném směru tedy s nejmenším odklonem od osy kompozitu. Přesahuje hodnotu 280 N, kdežto u nejslabších naměřených vzorků v podélném směru u dvouvrstvého kompozitu bylo naměřeno jen necelých 17 N.

4.2 Zkouška 3 – point bending na dynamicko – mechanické analýze (DMA)

Zkouška tříbodovým ohybem na dynamicko – mechanické analýze byla prováděna na přístroji DMA DX04T na vzorcích o velikosti 48 x 10 mm. Vzorky byly testovány při frekvenci 1 Hz. Jako konstantní veličina byla zvolena deformace a měřila se silová odezva materiálu.

Průměrné hodnoty naměřených veličin jednotlivých vzorků jsou uvedeny v následující tabulce (Tabulce číslo 5).

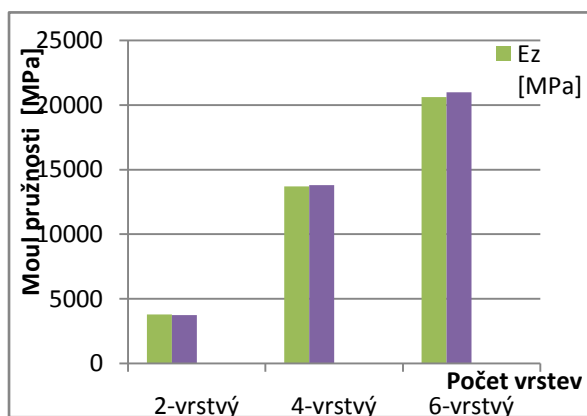
Tabulka č. 6: Průměr modelu pružnosti na začátku a na konci měření

vrstvy	vzorek	E _z [MPa]	E _k [MPa]	E' _z [MPa]	E' _k [MPa]	E'' _z [MPa]	E'' _k [MPa]	delta z	delta k	tg α z	tg α k
2	podélný	3855	3826	3855	3826	60,5	52,22	0,016	0,014	0,057	0,039
2	příčný	6117	6148,2	6117	6147,9	63,7	75,54	0,01	0,018	0,01	0,012
4	podélný	14030	14133	14030	14333	15,94	-8,62	0,001	-0,006	0,001	-0,006
4	příčný	6478	6519	6478	6519	39,87	34,37	0,006	0,005	0,006	0,005
6	podélný	20845	21265	20844	21264	187,7	243,1	0,009	0,01	0,009	0,01
6	příčný	7366	7498	7365	7498	78,1	64,7	0,01	0,008	0,01	0,008

Pozn.: Všechna naměřená data jsou umístěna na přiloženém CD, kde jsou i soubory se základními statistickými údaji a grafy.

Tabulka č. 7: Podélný komplexní E

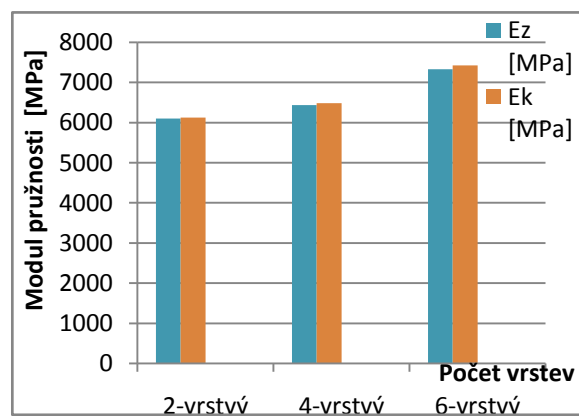
	Ez [MPa]	Ek [MPa]
2- vrstvý	3788	3750
4-vrstvý	13695,5	13810,5
6-vrstvý	20621	20993



Obr.4.4: Graf komplexního modulu pružnosti v podélném směru v závislosti na počtu vrstev

Tabulka č. 8: Příčný komplexní E

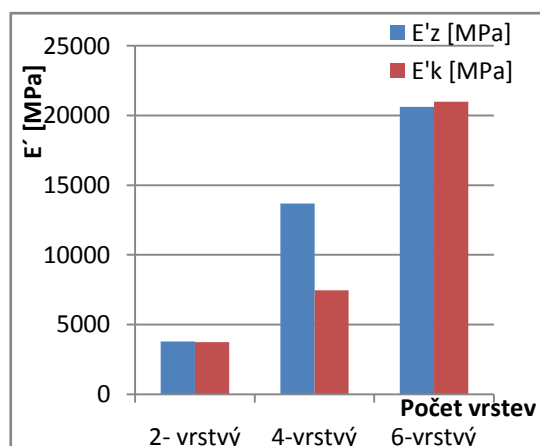
	Ez [MPa]	Ek [MPa]
2- vrstvý	6099,5	6127,9
4-vrstvý	6440,5	6481,5
6-vrstvý	7331	7428



Obr.4.5: Graf komplexního modulu pružnosti v příčném směru v závislosti na počtu vrstev

	E'z [MPa]	E'k [MPa]
2- vrstvý	3786,9	3748,5
4-vrstvý	13687	7452,5
6-vrstvý	20617	20987

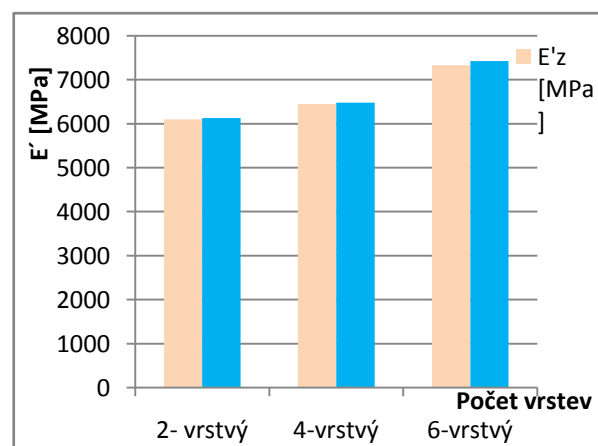
Tabulka č. 9: Podélný reálný E



Obr.4.6: Graf reálné složky modulu pružnosti v příčném směru v závislosti na počtu vrstev

	E'z [MPa]	E'k [MPa]
2- vrstvý	6099,5	6127,9
4-vrstvý	6449	6481
6-vrstvý	7330	7427

Tabulka č. 10: Příčný reálný E



Obr.4.7: Graf reálné složky modulu pružnosti v příčném směru v závislosti na počtu vrstev

Na obrázcích 4.4 a 4.5 jsou shrnuty komplexní moduly pružnosti u příčných a podélných měření na začátku i na konci měření. Nejvyšší modul pružnosti byl u šestivrstvého materiálu.

Na obrázcích 4.6 a 4.7 jsou shrnuty reálné moduly pružnosti u příčných a podélných měření na začátku i na konci měření. Nejvyšší modul pružnosti byl u šestivrstvého kompozitu.

Výslednou komponentou zkoušení kompozitu u tohoto testu je síla a modul pružnosti (E^*) – komplexní. Skládá se z reálné a imaginární složky.

Tabulka č.11: Hodnoty odchylek modulu pružnosti – horní mez

Typ	UP					
	zacatek	konec	zacatek'	konec'	zacatek''	konec''
2v_pod	0,0E+00	0,0E+00	6,4E+08	6,4E+08	7,6E+07	1,2E+07
2v_pric	2,5E+07	1,5E+07	7,6E+07	7,6E+07	9,5E+06	5,1E+06
4v_pod	2,5E+07	1,4E+08	6,0E+09	2,5E+08	6,4E+06	7,1E+07
4v_pric	3,8E+07	3,8E+09	0,0E+00	0,0E+00	1,0E+08	8,1E+07
6v_pod	2,5E+07	2,5E+09	1,9E+08	1,9E+08	7,9E+07	3,8E+06
6v_pric	0,0E+00	0,0E+00	6,4E+08	6,4E+08	1,2E+07	1,4E+07

Tabulka č.12: Hodnoty odchylek modulu pružnosti – horní mez

Typ	DOWN					
	zacatek	konec	zacatek'	konec'	zacatek''	konec''
2v_pod	1,9E+08	0,0E+00	6,4E+07	6,4E+08	1,9E+07	1,2E+07
2v_pric	8,9E+08	3,3E+07	7,0E+07	7,6E+07	1,3E+06	6,4E+06
4v_pod	1,5E+08	7,6E+07	2,7E+08	2,5E+08	6,8E+08	6,3E+08
4v_pric	2,5E+07	1,5E+08	3,8E+08	0,0E+00	3,0E+07	1,2E+08
6v_pod	5,7E+08	3,8E+07	6,4E+09	1,9E+08	8,1E+07	1,9E+08
6v_pric	8,9E+07	1,3E+07	7,0E+09	6,4E+08	1,1E+08	9,3E+07

Dle předpokladu nejvyšších hodnot komplexního modulu pružnosti vykazoval 6ti vrstvý kompozit v podélném směru. Tedy s nejmenším odklonem namáhání od osy vláken (rovingu). Odchyly spočítané pro 95% interval spolehlivosti jsou uvedeny v tabulce 11 a v tabulce 12, zvlášť pro horní a dolní úvrať měření.

4.3 Charpyho kladivo

Na Charpyho kladivu byla dokázána nejvyšší houževnatost nejsilnějšího materiálu. Nejpevnějším materiálem byl šestivrstvý uhlíkový kompozit s vlákny v podélném směru. Rázová síla potřebná k narušení těchto vzorků byla průměrně kolem $0,2 \text{ J/mm}^2$.

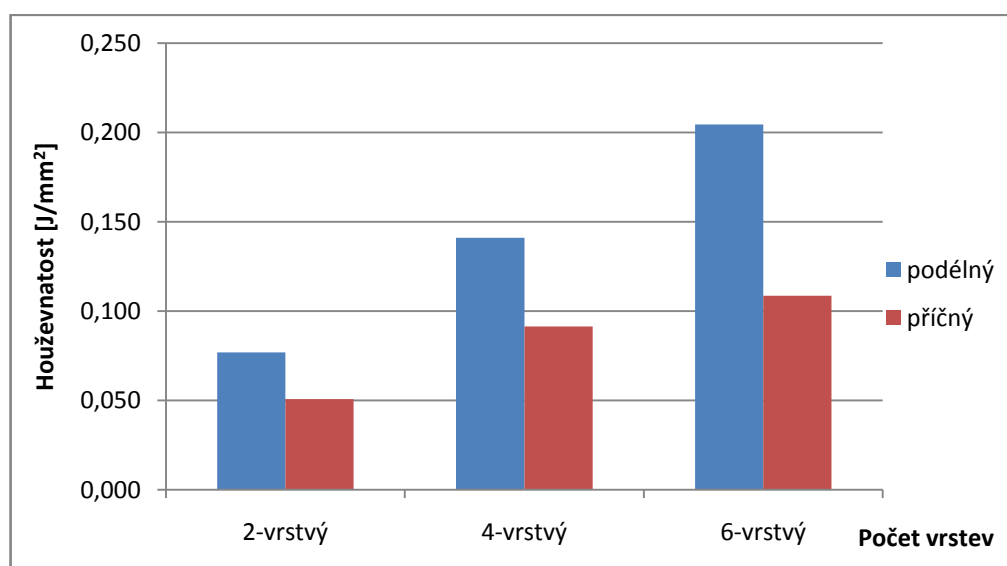
V tabulce č. 13 jsou přesné rozměry a statistické výpočty jednotlivých vzorečků dvouvrstvého uhlíkového kompozitu (energie a houževnatost, měrná hmotnost).

Tabulka č. 13: Tabulka hodnot 2-vrstveného kompozitu

Charpy vzorky			Podélné					Příčné				
			1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
průměrná šířka	mm		9,7	9,76	10,72	11,42	10,21	10,24	10,08	9,33	9,66	9,98
délka	mm		77	77	77	77	77	77	77	77	77	77
průměrná tloušťka	mm		0,75	1,02	1,05	1,03	1,32	1,09	1,26	1,43	1,26	1,43
váha	g		1,203	1,185	1,282	1,313	1,258	1,031	1,089	0,923	1,041	1,203
energie	J		0,72	0,76	1,06	0,69	0,76	10,52	7,21	0,61	0,65	0,76
ρ	g/cm ³		2,148	1,546	1,479	1,450	1,212	1,200	1,114	0,898	1,111	1,095
houževnatost	J/mm ²		0,099	0,076	0,094	0,059	0,056	0,943	0,568	0,046	0,053	0,053
						průměr	0,077					0,333
										vyb. prům		0,051

Tabulka č.14: Výsledky měření houževnatosti pomocí Charpyho kladiva

Houževnatost [J/mm ²]	podélný	příčný
2-vrstvý	0,077	0,051
4-vrstvý	0,141	0,091
6-vrstvý	0,205	0,109



Obr. 4.8: Průměrná rázová houževnatost testovaných kompozitů

V Obrázku 4.8 je vidět, že nejvyšší průměrná houževnatost vzorků je u šestivrstvého kompozitu podélného ve směru k ose kompozitu, tedy s menší odchylkou od osy vlákna než v příčném směru.

Na rázové zkoušce třiceti zkoumaných vzorečků je vidět že jejich houževnatost není přímo úměrná počtu vrstev, ale záleží na tom, jestli se jedná o kompozit v podélném směru nebo o kompozit v příčném směru.

Pozn.: Všechna naměřená data jsou umístěna na přiloženém CD, kde jsou i soubory se základními statistickými údaji a grafy.

5 Závěr

Cílem diplomové práce bylo prozkoumat mechanické vlastnosti u třech typů kompozitů. Prvním typem byl dvouvrstvý kompozit s úhly šedesát stupňů. Druhým typem byl čtyřvrstvý kompozit s úhlem šedesát stupňů. Třetím a posledním typem byl šestivrstvý kompozit s úhlem také šedesát stupňů. Z těchto typů byly dle pracovního postupu vytvořeny desky o ploše čtyřistaosmdesát čtyři centimetrů čtverečních. Z desek byly nařezány vzorky k samotnému mechanickému zkoušení materiálů. Všechny vzorky byly testovány ve směru kolmém na osu kompozitu a ve směru příčném rovnoběžném s osou kompozitu (osa úhlu 60°).

Vzorky materiálů byly nařezány na okružní pily rozměry dle normy jednotlivých přístrojů. U vzorků byla měřena rázová houževnatost na Charpyho kladivu značky Labortech. Dynamický tříbodový ohyb byl proveden na přístroji DMA a tříbodový ohyb statický na přístroji TIRA TEST 2300 Vše bylo měřeno za laboratorních podmínek na Katedře materiálového inženýrství.

Na výrobu vzorků bylo použito laboratoří Technické univerzity v Liberci, mimo dobu rozbité okružní pily, kdy byly vzorky po vytvrzení („upečení“) nařezány v domácích podmínkách.

Nejnáročnější fází byla fáze výroby samotných vzorků (vytvoření kompozitu a řezání). Všechny použité testovací přístroje, na kterých bylo měřeno, jsou vybaveny ovládacím a vyhodnocovacím software a ten pak vyhodnocení značně zjednodušil.

Jako první byla provedena zkouška houževnatosti na Charpyho kladivu, která nám po otestování každého vzorku zobrazila rázovou sílu potřebnou k narušení zkoušeného vzorku. S přibývajícemi vrstvami se zvyšovala houževnatost, dle předpokladu. Při testování třiceti vzorečků došlo ve 30 případech k prasknutí materiálu v místě nárazu kladiva. Energie vynaložená k narušení struktury karbonových vláken vytvrzených s matricí je větší s počtem vrstev.

Druhým přístrojem v pořadí, na kterém byly testovány vzorky, byla Dynamicko-mechanická analýza, přístroj zvaný DMA. Umístěný vzorek byl moderní technikou namáhán do průhybu jednoho milimetru šedesát krát za minutu. Vzorek byl delší než podpěry přístroje, na délce přesahu nezáleželo, ale musela být alespoň na obou stranách podpěr o 2-3 mm delší než rozteč podpěr, jinak se vzorek vysmekával. Co muselo být přesné, je šířka, jakmile přesáhla jedenácti a půl milimetru, tak se vzorek do čelistí nevešel. Modul pružnosti se po celou dobu testování neměnil a zůstal stále na stejné hodnotě. Z toho vyplývá, že testovaný materiál je vhodný zvolený druh dynamického namáhání. Ve všech zkoumaných vzorcích nedošlo při tomto testu k viditelnému vnějšímu poškození.

Třetím testováním mechanických vlastností byla zkouška statického tříbodého ohybu na přístroji TIRA 2300. Vzorky byly upevněny na podpěrách s roztečí třicet šest milimetrů od sebe vzdálených podpěr. Vzorky o rozměru délky čtyřiceti milimetrů byly testovány do určitého průhybu staticky – tlakem, který vyvíjel třetí bod z vrchu, ten byl přesně v polovině vzorku. Část vzorečků během testování praskla, po jejich průhybu za bod deformace.

Výroba vzorků na profesionální testování byla amatérská. Vzorky nebyly lisovány a matrice se na vzorky nanášela vtlačením z jedné strany desky formy, kdy nedocházelo k rovnoměrnému prosycování vláken. U vícevrstvého vzorku byl problém znovu vyrobit čtyř a šesti vrstvý kompozit, protože nebylo možné vrstvy rovingů dostatečně prosytit matricí. Toto bylo zjištěno až po vytvrzení kompozitu a otevření formy, která musela nejprve vychladnout.

Budoucnost a použití karbonových materiálů je ovlivněna jejich cenou. V současnosti je karbon poměrně drahá surovina a v horizontu pěti let se dle předních výrobců karbonových vláken nechystá její snížení. Nejvyšší položkou v nákladech jsou výrobní náklady, které je možné snížit použitím výrobního zařízení s větší účinností a sníženou energetickou spotřebou. V průmyslu kompozitů je i otázka recyklovatelnosti kompozitů. Aktuálně ji řeší francouzská firma, která koncem roku 2013, po patentování recyklace, přijde na trh s novým způsobem recyklace. Matrici v peci vypálí, ale ne na tolik stupňů, aby se nenarušila statika vláken, které se pak perou a suší.

Použitá literatura

- [1] <http://www.jeccomposites.com/sectors/sports-leisure/> [online]. [cit. 12-10-2012]
- [2] <http://www.jeccomposites.com/> [online]. [cit. 12-10-2012]
- [3] <http://www.ashland.com/solutions/markets/biorefining/> [online]. [cit. 10-12-2012]
- [4] <http://www.sohim.by/en/catalog/carbon/> [online]. [cit. 12-02-2013].
- [5] <http://www.5m.cz/cz/o-firme/> [online]. [cit. 20-02-2013].
- [6] <http://www.duratec.cz/cs/techinfo/uhlikova-vlakna-karbonove-kompozity> [online]. [cit. 20-02-2013].
- [7] <http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>, [online]. [cit. 09-03-2013].
- [8] Kořínek, Z. Kompozity.
[<http://www.volny.cz/zkorinek/>]. 4.11.2009, [online]. [cit. 09-03-2013].
- [9] www.saertex.com, [online]. [cit. 17-10-2012].
- [10] <http://www.saertex.com/uploads/media/>, [online]. [cit. 17-10-2012].
- [11] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/631-hookuv-zakon-pro-pruznou-deformaci>, [online]. [cit. 09-03-2013].
- [12] <http://pardubice.ic.cz/uhlik.htm>, [online]. [cit. 09-04-2013].
- [13] <http://www.technofiber.cz/technologie.cz.html>, [online]. [cit. 10-03-2013].
- [14] <http://www.modding.cz>, [online]. [cit. 09-03-2013].
- [15] <http://www.altimabohemia.cz/biaxalni-a-multiaxalni-tkaniny.html>, [online]. [cit. 01-03-2013].

- [16] R.A. Bareš: Kompozitní materiály, SNTL Praha 1988
- [17] Agarwal, B.D., Broutman, L.J.: Vláknové kompozity, SNTL Praha 1987
- [18] Gottfried W. Ehrenstein: Polymerní kompozitní materiály, SCIENTIA Praha 2009
- [19] M.F.Ashby: Materials Selection in Mechanical Design. 3. ed. Butterworth-Heinemann, (2005)
- [20] R.G.Weatherhead, FRP Technology, Applied science publishers London 1980
- [21] Various authors, Flexible Textile Composites, The textile Trade Press, Manchester, England
- [22] <http://www.jeccomposites.com/content/jec-europe-2013-carbon-conference>, [online].[cit. 01-04-2013].
- [23] <http://www.compositesworld.com/articles/the-key-to-cnts-functionalization>, [online].[cit. 01-04-2013].
- [24] Lučební závody Kolín [online].[cit. 12-02-2009].
- Dostupný z: <http://lucetni.hink.cz/data/data/Lukosil/Prospekty/Lukosil.pdf>
- [25] Norma pro Charpy test:
MSZ EN ISO 179-1: 2001
Plastics.Determination of Charpy Impact Properties. Part 1: Non-Instrumented Impact Test. (ISO 179-1: 2000)
- [26] Bc. Markéta Hovorková, Dynamicko - mechanická analýza kompozitů s anorganickou výztuží, Diplomová práce, Liberec 2010
- [27] Skriptum TU Liberec
[\[http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060106/prednaska7.pdf\]](http://www.ft.vslib.cz/depart/ktm/files/20060106/prednaska7.pdf) [online].[cit. 01-04-2013].
- [28] Návod k obsluze pro DMA DX04T a software DMA Grapher Version 1.5

- [29] Kunteová, P.: Dynamicko-mechanické vlastnosti kompozitních materiálů s pletenou čedičovou a skleněnou výztuží, Diplomová práce, TU Liberec 2009
- [30] <http://www.spssol.cz/~vyuka/TRIDY/2.C/000-HOOK%D9V%20Z%C1KON.pdf>, [online].[cit. 020-05-2013].
- [31] Minář, L.: Mechanické vlastnosti kompozitních materiálů s výztuží z uhlíkových vláken, Bakalářská práce, TU Liberec 2013
- [32] Praktikum ze struktury a vlastností polymerů – zkouška ohybem.
[<http://www.fch.vutbr.cz/home/prikryl/praktikaletu/uloha9.doc>]. Ústav chemie materiálů. [online].[cit. 01-05-2013].
- [33] <http://www.bikeradar.com/us/>, [online].[cit. 01-05-2013].
- [34] DOC.ING.KAREL DAŘOUREK,CSc. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. první. Liberec: Vysokoškolský podnik Liberec, s.s r.o., Hálkova 6, Liberec, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1
- [35] Hrazdíra, M.: Materiály na bázi uhlíku a jejich využití, Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, 2010